

文章编号 1004-924X(2016)12-2925-06

大口径 N41 型激光钽玻璃的小信号增益

温 磊^{1,2}, 陈 林^{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: 比较了国内外高功率激光钽玻璃的主要性质及发展状态, 重点分析了中国科学院上海光学精密机械研究所近年来研制的大口径 N41 型激光钽玻璃的物理性能及其在 400 mm 口径片状放大器系统中的增益特性。利用优化片状放大器技术方案, 测定了 N41 钽玻璃与 N31~42 钽玻璃的小信号净增益系数和大口径增益均匀性。实验显示, 在相同测试条件下, N41 型钽玻璃的某些关键性能参数优于 N31 型钽玻璃; 在相同抽运条件下, N41 钽玻璃和 N31 钽玻璃的平均小信号净增益系数分别达到 5.3% 和 5.16%, 远优于神光-III 主机 N31~35 钽玻璃的在线测试结果; 385 mm 口径内 N41 钽玻璃增益均匀性为 1.085 : 1, N41 钽玻璃的包边性能满足装置使用要求。结果表明: 新型 N41 钽玻璃的增益性能较 N31 钽玻璃有了显著提升, 在放大器结构优化的条件下, 可满足下一代 ICF 激光驱动系统的需求。

关键词: 激光聚变; 激光材料; N41 钽玻璃; 增益性能; 小信号增益系数

中图分类号: TN244 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162412.2925

Small signal gain of glass N41 in large aperture Nd:laser

WEN Lei^{1,2}, CHEN Lin^{3*}, CHEN Wei², HU Li-li², WU Yi-qun⁴

- (1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
2. *High Power Laser Components R&D Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China;*
3. *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;*
4. *Laboratory for High Density Optics Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)*
* *Corresponding author, E-mail: linxiaoqiao@126.com*

Abstract: The main properties of high-power Nd : laser glass in China and abroad and its development situations were compared. Then, the physical properties of large aperture N41 Nd : glass developed by Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics of the Chinese Academy of Sciences(SIOM) were analyzed and its gain characteristics in a segment amplification system with an aperture of 400 nm was investigated. An optimized technological scheme was used to measure the small-signal net-gain param-

收稿日期: 2016-10-18; 修订日期: 2016-10-26.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(No. 61405215)

eters of N41 glass and N31-42 glass and the gain homogeneity of large aperture glass under the same condition. The results indicate that the several key parameters of N41 glass are better than that of the N31 glass. Under the same pumping condition, the average small-signal net-gain parameters for N41 glass and N31 glass are 5.3% and 5.16%, respectively, much better than the online experimental result of N31-35 glass used in Shenguang-III. Moreover, the gain homogeneity of N41 glass with an aperture of 385 mm is 1.085 : 1, and its cladding glass meets the requirement of Shenguang-III. It concludes that the gain characteristics of the N41 glass have been improved greatly as compared with that of the N31 glass. When the amplifier structure is optimized, the N41 glass can be used in the Shenguang system in the future.

Key words: laser fusion; laser material; N41 Nd:glass; gain characteristic; small-signal net-gain parameter

1 引言

目前用于惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究的激光驱动器,如美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)、法国兆焦耳装置(Laser MegaJoule, LMJ)与中国的神光-II、神光-III装置等,均采用了以大口径钕玻璃为增益介质的放大器系统,该系统是装置的重要组成部分^[1-2]。与神光系列装置采用的 N31-35 型大口径激光钕玻璃相比,中国科学院上海光学精密机械研究所(以下简称“上海光机所”)N41 型大口径激光钕玻璃片有以下两个方面的特点:一是激光物理参数更加优良,包括受激发射截面、荧光寿命、1 053 nm 线性折射率等,有利于系统的高增益输出;二是低非线性折射率系数(n_2),有利于控制装置的非线性效应,实现大能量高功率输出。

本文主要研究了利用单坩埚熔炼工艺制备的大口径 N41 型激光钕玻璃的激光物理性能及其在 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器系统中的增益性能,并在相同的测试条件下测试了 N31-42 型激光钕玻璃的增益性能,最后将二者的增益性能与神光-III 主机使用的 N31-35 钕玻璃的增益性能进行了比较。

2 国内外大口径激光钕玻璃简介

美国 NIF 装置和法国 LMJ 装置中均采用了 SCHOTT 公司 LG-770 和 HOYA 公司 LHG-8 两种磷酸盐钕玻璃。我国的神光-II 和最近建成的神光-III 主机装置均采用 N31 型磷酸盐钕玻璃,与 NIF 装置使用的两种钕玻璃相比,其主要差异在于钕离子掺杂浓度、荧光寿命、受激发射截面和非线性折射率系数等性能,主要参数对比如表 1 所示。综合抽运条件的差异,导致我国神光-III 主机装置与美国 NIF 装置在片状放大器系统通光口径相同、结构类似的情况下输出的小信号增益系数相差 15% 左右^[3-7],如表 2 所示。

表 1 几种钕玻璃的主要参数对比抽运^[8]

Tab. 1 Properties comparison among different neodymium glasses

| 参数 | N31 | N41 | LG770 | LHG-8 |
|--|------------|-------|-------|-------|
| Nd ³⁺ 掺杂浓度 / 10^{20} cm^{-3} | 3.5 or 4.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 |
| 受激发射截面 / 10^{-20} cm^2 | 3.8 | 3.9 | 3.9 | 3.6 |
| 荧光寿命/ μs | 310 or 300 | 310 | 320 | 310 |
| 1 053 nm 非线性折射率 系数 $n_2/10^{-13} \text{ esu}$ | 1.20 | 1.05 | 1.02 | 1.13 |
| 折射率(1 053 nm) | 1.532 | 1.504 | 1.499 | 1.520 |
| 密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 2.85 | 2.596 | 2.585 | 2.83 |

表 2 国内外 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器的性能对比
Tab. 2 Properties comparison of 4×2 configuration slab amplifier between NIF and SG-III

| 参数 | NIF | SG-III |
|-----------------------------------|--------------------|-------------------|
| 钕玻璃元件组合结构 | 4×2 | 4×2 |
| 通光口径/(mm×mm) | 400×400 | 400×400 |
| 钕玻璃尺寸 (mm×mm×mm) | 810×460×41 | 810×460×40 |
| 钕玻璃牌号 | LG-770(SCHOTT) | N31(SIOM*) |
| | LHG-8(HOYA) | |
| 氙灯尺寸 (diameter×arc length, mm) | Φ48×1 800 | Φ48×1 850 |
| 氙灯气压/Pa | 1.47×10^4 | 1.6×10^4 |
| 每 LC 回路氙灯数量 | 2 | 2 |
| 抽运脉冲波形 | 临界阻尼脉冲 | 临界阻尼脉冲 |
| 抽运密度/(J·cm ⁻³) | 9.86 | 9.42 |
| 抽运脉冲宽度/10 ⁻¹ | 470 | 620 |
| 小信号增益系数/(%·cm ⁻¹) | 5.20 | 5(含 0.45 动态损耗) |
| 增益均匀性 (最大值/平均值) | 1.08:1(预测值) | 1.05:1 |
| 热恢复时间/h | <4 | <4 |

* SIOM: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics (上海光机所)

为了提高装置的输出能量与功率,传统策略通过增加钕玻璃片数来增加总增益长度,从而提高系统的总增益能力;但在深度饱和的条件下,增加总增益长度将带来严重的非线性效应,功率受限严重制约着主放大系统的输出峰值功率。因此首先从增益材料的角度出发,如何能提高片状放大器的小信号增益系数与增益能力,同时降低整个系统的非线性效应,是工程总体设计需要解决的关键问题。

提高片状放大器系统的增益能力应首先从改进增益材料——钕玻璃的激光物理性能出发。为了满足高功率激光装置对增益介质材料输出能力的要求,上海光机所近年来研发了 N41 型磷酸盐钕玻璃,以获得更高的受激发射截面和更低的非线性折射率系数。N41 钕玻璃与其他几种钕玻璃的参数比较如表 1 所示。

3 实验方案

实验采用的钕玻璃尺寸为 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。氙灯排布于钕玻璃片两侧,氙灯

与钕玻璃片之间利用隔板玻璃进行隔断,除防止灯箱片箱之间相互污染外,还可避免氙灯产生的声波传输进光路中引起波前畸变,并在灯箱与片箱中分别形成冷却气体的通道。同时为提高抽运光的传输效率,隔板玻璃镀有化学膜层,对氙灯光的平均透过率大于 94%;氙灯反射器采用镀银反射器,对氙灯光的平均反射率大于 92%。

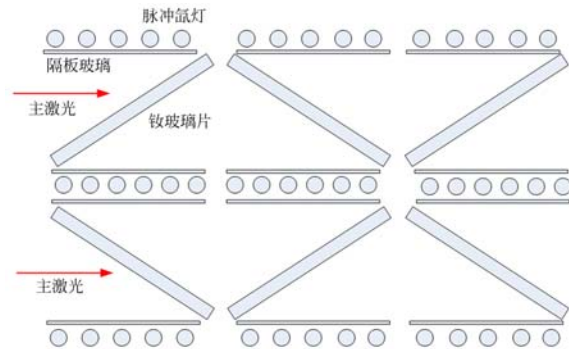


图 1 4×2 组合式片状放大器的基本结构示意图(3 片长)
Fig. 1 Basic structure of 4×2 configuration slab amplifier

本实验采用了与神光-III 主机、美国 NIF、法国 LMJ 等装置 400 mm 口径片状放大器不同的技术方案。侧灯箱与中灯箱均采用更小直径的氙灯,氙灯排布更加紧密,从而在不增加氙灯负载的

表 3 N41 钕玻璃增益性能测试实验的基本参数
Tab. 3 Experimental parameters for testing gain properties of N41 Nd: glass

| 项目 | 参数条件 |
|--------------------------|--|
| 通光口径/(mm×mm) | 400 mm×400 mm |
| 结构形式 | 4×2 |
| 工作电压/kV | 26(预电离)+31(主放电) |
| 组件直流耐压/kV | 80 |
| 主预放电延迟/μs | 250 |
| 电流脉宽/μs (10%-10%电流脉宽) | 430±10 |
| 氙灯尺寸/mm | 外径 37,灯管壁厚 3, 长度 1 850 |
| 氙灯气压/Pa | 2.13×10^4 |
| 串联方式 | 两灯串联 |
| 电缆传输效率 | ≥90% |
| 回路数 | 6+7+6,中灯箱,7 回路(14 支灯)、 侧灯箱 6 回路(12 支灯) |
| 反射器 | 侧灯箱渐开线镀银反射器, 对 400~1 000 nm 氙灯光的平均 反射率大于 92%、中灯箱无反射器 |
| 隔板玻璃 | 厚度 10 mm,镀膜处理, 对 400~1 000 nm 氙灯 光的平均透过率大于 95% |

情况下增加抽运密度,此时系统运行电压更高,抽运脉宽更短,放大自发辐射效应(ASE)得到抑制,能够获得高增益输出,基本参数如表 3 所示。

4 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 2 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。首先测量静态时(让激光通过放大器而放大器氙灯不工作)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_{inb} 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;最后测量动态时(测量激光通过放大器且放大器氙灯正常工作)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:

$$G_D = \frac{(E_{out2} - E_{outb}) / (E_{in2} - E_{inb})}{E_{out1} / E_{in1}} \quad (1)$$

那么片状放大器的小信号增益系数 β 可由下式推出:

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

式中: n 为钕玻璃材料在 1 053 nm 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。

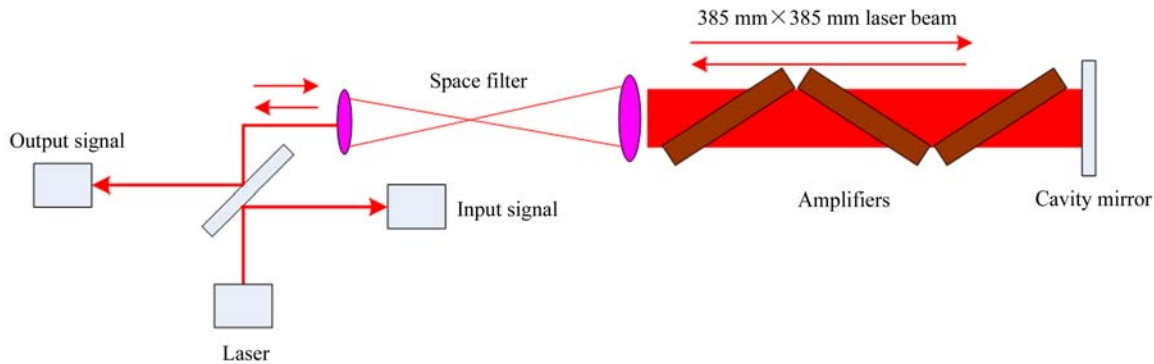


图 2 增益性能测量光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of light path in gain property measurement

本实验在相同测试条件下分别测试了 N41 和 N31-42 钕玻璃,测试片的物理参数如表 4 所示。在主放电电压为 31 kV 的条件下测试得到, N41 钕玻璃的平均小信号净增益系数为 5.3%/cm, N31-42 钕玻璃的平均小信号净增益系数为 5.16%/cm。小信号净增益系数不含动态损耗。表 5 列出了本实验测试结果与神光-III 主机输出的小信号增益系数。从表中可知,对比神光-III 主机 N31-35 钕玻璃的小信号净增益系数, N41 钕玻璃提高了 17%, N31-42 钕玻璃提高了 14%;抽运过程中钕玻璃的动态损耗约为静态损耗的 3 倍,得到 N41 钕玻璃与 N31-42 钕玻璃的净增益损耗比分别为 14.7 和 14.9,均优于神光-III 主机的净增益损耗比。

表 4 钕玻璃测试片的物理参数

Tab. 4 Parameters of Nd glass testing slabs

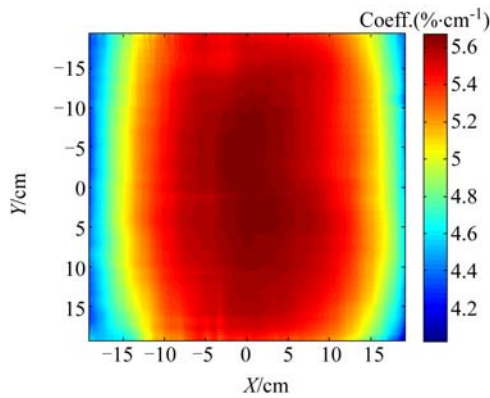
| 参数 | N41 | N31 |
|--|-----------------|--------------|
| Nd ³⁺ 掺杂浓度 / (10 ²⁰ cm ⁻³) | 4.11 | 4.14 |
| 受激发射截面 / (10 ⁻²⁰ cm ²) | 3.85 | 3.74 |
| 荧光寿命 / μ s | 310 | 300 |
| 1 053 nm 非线性折射率系数 n_2 (10 ⁻¹³ esu) | 1.06 | 1.23 |
| 折射率 (1 053 nm) | 1.504 | 1.520 |
| 损耗 (1 053 nm, %/cm) | 0.12 | 0.115 |
| 尺寸 (长×宽×厚, mm) | 808.75×458.9×40 | 809×458.9×40 |

表 5 小信号净增益系数测试结果

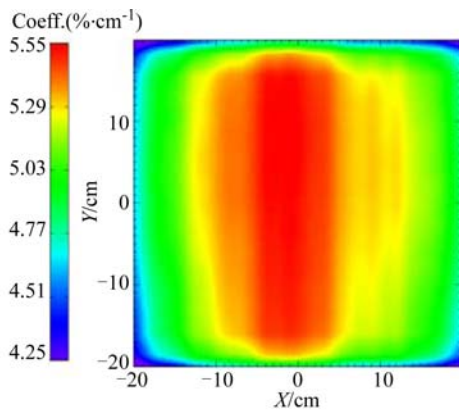
Tab. 5 Test results of small signal net gain coefficient

| 参数 | N41 | N31 | N31(神光-III) |
|--|------|------|-------------|
| Nd ³⁺ 掺杂浓度/(10 ²⁰ cm ⁻³) | 4.11 | 4.14 | 3.45 |
| 主放电电压 | 31 | 31 | 21.5 |
| 小信号净增益系数/cm ⁻¹ | 5.3 | 5.16 | 4.53 |
| 净增益损耗比 | 14.7 | 14.9 | 10 |

利用 CCD 相机测试了 N41 钕玻璃的增益均匀性,测试口径为 385 mm×385 mm,通过多发次求平均以获取放大器的增益分布。测试基本条件是平均小信号净增益系数达到 5.25%/cm,五发次求平均,并通过匀滑算法去除初始增益分布中的噪声,实验测量系统的增益均匀性为 1.085 : 1 (最大值/平均值),如图 3(a)所示。图 3(b)所示为 NIF 预测平均小信号增益系数为 5.1%/cm 时



(a)N41



(b)NIF

图 3 本实验增益均匀性分布与 NIF 预测的结果对比
Fig. 3 Comparison of gain homogeneity between our results and NIF predicted results

的增益分布。从图中可以看出,本实验获得的增益均匀性与 NIF 预测水平基本相当。

钕玻璃包边性能的优劣对于钕玻璃的增益性能起着至关重要的作用,包边剩余反射率是评判钕玻璃包边性能最重要的指标之一。它表示了钕玻璃内部的杂散光到达钕玻璃与包边玻璃界面时被包边玻璃吸收的情况。通常装置要求剩余反射率需低于千分之一。利用上海光机所最近研制的钕玻璃包边剩余反射测试验证平台,测试了 N41 钕玻璃短边的剩余反射率分布,测试结果如图 4 所示。从图中可以看出,整个短边包边界面范围的剩余反射率分布均在 10⁻⁵ 量级,远优于装置要求,从另一个方面保证了大口径范围内的高增益均匀性。

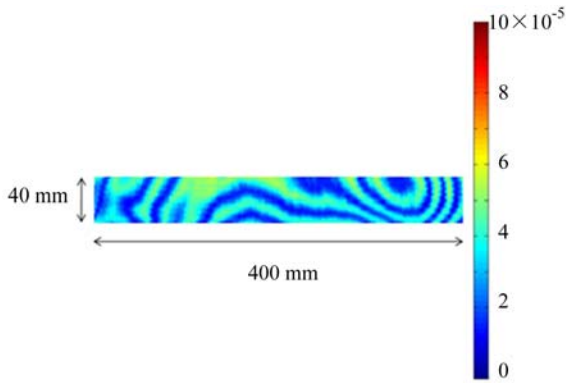


图 4 N41 钕玻璃短边包边的剩余反射率分布
Fig. 4 Residual reflectivity distribution of N41 neodymium glass edge cladding

5 结 论

本文利用优化片状放大器技术方案,研究了 N41 型大口径激光钕玻璃的综合增益性能。实验结果表明,N41 钕玻璃的平均小信号净增益系数为 5.3%,增益损耗比为 14.9,增益均匀性(最大值/平均值)为 1.085 : 1。激光参数性能优于 N31-42 型大口径激光钕玻璃与神光-III 主机目前使用的 N31-35 型大口径激光钕玻璃。基于片状放大器新型抽运技术,采用 N41 型大口径激光钕玻璃,系统输出的平均小信号净增益系数首次超过 5.25%,与美国 NIF 装置的水平相当,表明我国钕玻璃研制水平与放大器结构优化均迈入了一个新的阶段,为后续的惯性约束聚变装置建设奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] ROTTER M D, McCracken R W, ERLANDSON A C, *et al.*. Gain measurements on a prototype NIF/LMJ amplifier pump cavity [J]. *SPIE*, 1997, 3047:178-187.
- [2] 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
- LIU Y, CHEN Y B, HAO X, *et al.*. Measurement on gain uniformity of slab amplifiers on integration-test-bed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(s2): s214003. (in Chinese)
- [3] 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.
- WEN L, YANG J X, LIU R H, *et al.*. Small signal gain coefficients in Nd³⁺ doped phosphate glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0302009. (in Chinese)
- [4] 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.
- HAO X, CHEN L, CHEN Y B, *et al.*. Research on the measurement methods for the gain distribution uniformity of large aperture slab amplifiers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(s1): s108001. (in Chinese)
- [5] KOECHNER W. 固体激光工程[M]. 孙文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- KOECHNER W. *Solid-State Laser Engineering* [M]. SUN W, JIANG Z W, CHEN G X, Transl. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [6] 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.
- HE SH B. *Studies on Characteristic of Spontaneous Radiation Amplify in Laser Amplifier* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2002. (in Chinese)
- [7] 温磊, 陈林, 刘建国, 等. N31 钕玻璃片状放大器增益特性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0402008.
- WEN L, CHEN L, LIU J G, *et al.*. Investigation of gain property of the N31 neodymium glass slab amplifiers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0402008. (in Chinese)
- [8] CAMPBELL J H, HAYDEN J S, MARKER A. High-power solid-state lasers: a laser glass perspective [J]. *International Journal of Applied Glass Science*, 2011, 2(1):3-29.

作者简介:



温磊(1978—),男,山西太原人,硕士,高级工程师,2001年于山西大学获得学士学位,2009年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得硕士学位,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

通讯作者:



陈林(1984—),男,四川乐山人,硕士,助理研究员,2006年于国防科技大学获得学士学位,2009年于中国工程物理研究院激光聚变研究中心获得硕士学位,主要从事高功率固体激光放大性能的研究。E-mail: linxiaoqiao@126.com