

掺钕磷酸盐玻璃的小信号增益性能

温 磊¹ 杨镜新² 刘仁红² 冯素雅¹ 栾 飞¹ 陈 伟¹ 胡丽丽¹

(¹ 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 201800)
(² 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘要 测试了应用于神光 II 系列装置 93 片 N31 型钕玻璃的小信号增益系数。结果表明, Nd_2O_3 质量分数为 2.2% 的钕玻璃平均小信号增益系数为 0.0387 cm^{-1} , Nd_2O_3 质量分数为 3.0% 的钕玻璃平均小信号增益系数为 0.0416 cm^{-1} , 两种浓度的钕玻璃不同样品间小信号增益系数的起伏范围分别为 0.86% 和 0.76%。根据所测定的增益值, 表明 N31 型钕玻璃的增益起伏符合神光 II 系列装置要求, 为实现该装置中每一路增益性能的平衡提供了有力保障, 也为今后对更大尺寸钕玻璃增益性质的控制提供了经验。

关键词 激光器; 钕玻璃; 增益系数; 增益一致性

中图分类号 TN244 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0302009

Small Signal Gain Coefficients in Nd^{3+} Doped Phosphate Glass

Wen Lei¹ Yang Jingxin² Liu Renhong² Feng Suyu¹ Luan Fei¹ Chen Wei¹ Hu Lili¹

¹ High Power Laser Components Research and Development Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Small signal gain coefficients (SSGC) of 93 pieces N31 Nd^{3+} doped glasses for Shenguang II high power laser system are tested. Results show that the average SSGC of Nd glasses with 2.2% mass fraction of Nd_2O_3 and 3.0% mass fraction of Nd_2O_3 are 0.0387 cm^{-1} and 0.0416 cm^{-1} respectively. Gain fluctuation range of these two kinds of Nd glasses are 0.86% and 0.76% respectively. This result demonstrates that the gain fluctuation range of N31 Nd glasses meets the requests of Shenguang II projects and definitely provides the gain equilibrium for every beam laser in this system. This experiment is a valuable experience for controlling the gain properties of even larger Nd glass in the future.

Key words lasers; Nd glass; gain coefficient; gain homogeneity

OCIS codes 140.3280; 140.3380; 140.3530

1 引 言

N31 型掺钕磷酸盐激光玻璃自 20 世纪 90 年代定型生产以来, 已经成功地应用于神光 II 系列装置、神光 III 原型装置上, 并即将应用于神光 III 主机装置上。经过近十几年的使用^[1~3], 证明国产 N31 型钕玻璃在各项性能指标上完全能达到设计要求^[4], 与应用在美国国家点火装置 (NIF) 上由 Schott 和 HOYA 公司生产的钕玻璃性能接近^[5~9]。为了在

神光 II 系列装置中进一步平衡每一路的增益性能, 研究了装置中每一片钕玻璃的小信号增益系数, 并且结合荧光寿命及激光波长损耗, 对小信号增益系数进行了详细的分析, 也讨论了对增益大小具有重要影响的两个因素: 荧光寿命和 1053 nm 损耗。测试结果对于实现神光 II 系列装置中各路增益性能的平衡有一定的参考价值。

收稿日期: 2010-08-20; 收到修改稿日期: 2010-11-08

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 温 磊 (1978—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光玻璃光谱及激光性能方面的研究。

E-mail: wenlei@siom.ac.cn

2 实验方法

设计了如图 1 所示的测试装置,光源为输出波长1053 nm的激光器,输出为1 mW的连续光,经过准直系统后进入测试样品棒中,样品棒的规格为 $\phi 8 \text{ mm} \times 162 \text{ mm}$,腔长为155 mm,双灯抽运,重复频率为1 Hz,测试电压为1200 V,样品棒水冷,水温

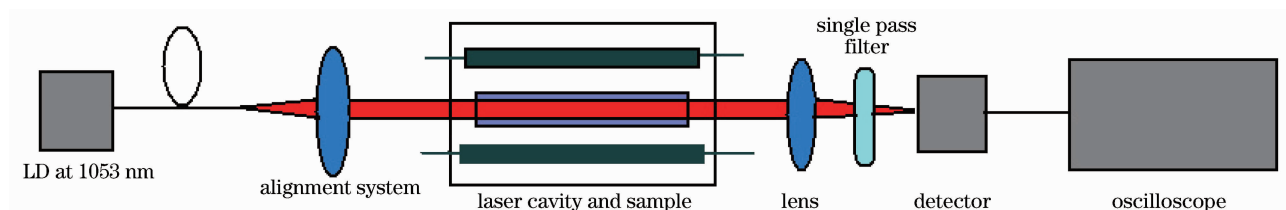


图 1 小信号增益测试装置示意图

Fig. 1 Testing instruments of small signal gain coefficient

小信号增益系数 G 表示为

$$G = \ln(V_2/V_1)/L, \quad (1)$$

式中 V_1 为未抽运时示波器上读出的光强电压信号, V_2 为抽运时信号光经过放大后示波器上读出的光强电压信号, L 为样品棒的有效长度。为减小读数误差,每支样品棒在测试电压下测试 3 次,每次 V_1 与 V_2 值分别记录 40 组,取平均值后代入(1)式,得到 3 次的 G 值,再取平均值,作为样品棒的小信号增益系数。

为了避免棒的端面加工状况影响增益效果,每一支棒都用 ZYGO 干涉仪进行了棒两端面面形和透过波前畸变测试。测试结果表明棒的两端面面形和透过波前畸变均优于 $\lambda/6$,完全可以排除加工因素的干扰。图 2 为典型样品的透过波前畸变检测图。

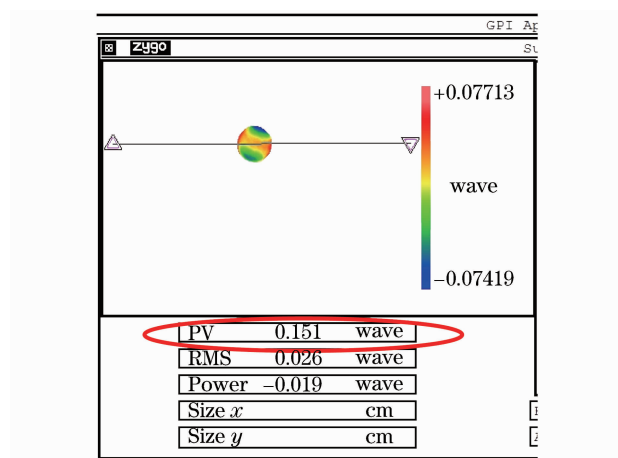


图 2 样品的透过波前畸变检测图

Fig. 2 Transmitted wave front error testing diagram of the sample

控制在 26°C 。在信号光的出射端放置了一个聚焦透镜,以保证信号光可以完全进入探测器,在聚焦透镜和探测器中间,放置了一个1053 nm单通滤光片,用来滤除1053 nm信号光以外的杂散光。探测器为硅光二极管,最后从示波器读出测试光信号电压值。

3 结果与讨论

本次实验的样品棒有两种 Nd_2O_3 的掺杂浓度,分别为2.2%质量分数和3.0%质量分数,对应的玻璃型号分别为 N3122 和 N3130,样品数量共计 93 支。其中 N3130 钕玻璃的荧光寿命为 $325 \sim 335 \mu\text{s}$,绝大部分为 $330 \mu\text{s}$; N3122 钕玻璃的荧光寿命为 $340 \sim 355 \mu\text{s}$,绝大部分为 $350 \mu\text{s}$ 。两种浓度钕玻璃的 1053 nm 损耗均不超过 $0.15\% \text{ cm}^{-1}$; 3000 cm^{-1} 吸收系数均远小于 2 cm^{-1} 。表 1 列出了用于神光 II 系列装置钕玻璃的关键技术参数,从中可以看出以上参数都完全符合神光 II 系列装置用钕玻璃的设计要求。

表 1 N31 型钕玻璃主要设计参数

Table 1 Main parameters of N31 Nd glasses

Parameter	N3122	N3130
Fluorescence lifetime / μs	340	320
Loss at 1053 nm / ($\% \text{ cm}^{-1}$)	≤ 0.15	≤ 0.15
Absorption coefficient at		
3000 $\text{cm}^{-1} / \text{cm}^{-1}$	≤ 2	≤ 2
Gain fluctuation / %	≤ 2	≤ 2

N3130 钕玻璃的小信号增益系数平均值为 0.0417 cm^{-1} ,整体标准偏差为 0.76% ; N3122 钕玻璃的小信号增益系数平均值为 0.0387 cm^{-1} ,整体标准偏差比 N3130 钕玻璃略大,为 0.86% 。参考表 1 可知,本测试结果完全符合神光 II 系列装置对于小信号增益一致性的要求。

下面详细讨论不同荧光寿命和不同1053 nm损耗情况下对小信号增益系数的影响。表 2 列出了不同荧光寿命时两种玻璃的小信号增益系数。对于 N3130 钕玻璃,列出了荧光寿命分别为 $335, 330$ 和 $325 \mu\text{s}$ 时样品数量及对应小信号增益系数的平均

值；对于 N3122 铋玻璃，同样列出了荧光寿命分别为 355, 350, 345 和 340 μs 时样品数量及对应小信号增益系数的平均值。

从表 2 可以看出，两种玻璃增益系数平均值并没有随荧光寿命的变化而有明显的变化，N3122 铋玻璃荧光寿命为 355 μs 的样品增益系数为

表 2 不同荧光寿命铋玻璃的小信号增益系数

Table 2 Small signal gain coefficients in different lifetime samples

Fluorescence lifetime / μs	N3130				N3122		
	335	330	325	355	350	345	340
Quantity of samples	4	30	2	1	36	9	11
Average gain coefficients / cm^{-1}	0.0417	0.0417	0.0418	0.0392	0.0387	0.0388	0.0387

表 3 不同 1053 nm 损耗铋玻璃的小信号增益系数

Table 3 Small signal gain coefficients in different loss samples at 1053 nm

Loss at 1053 nm / ($\%\text{cm}^{-1}$)	N3130					
	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
Quantity of samples	2	15	12	1	3	3
Average gain coefficients / cm^{-1}	0.0413	0.0418	0.0417	0.0420	0.0416	0.0416
Loss at 1053 nm / ($\%\text{cm}^{-1}$)	N3122					
	0.10	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15
Quantity of samples	5	11	19	11	10	1
Average gain coefficients / cm^{-1}	0.0387	0.0387	0.0388	0.0386	0.0388	0.0383

从表 3 中可以看出，样品增益系数依旧没有体现出明显的随 1053 nm 损耗变化的趋势。其中 N3130 铋玻璃 1053 nm 损耗为 0.10 $\%\text{cm}^{-1}$ 的样品增益系数平均值为 0.0413 cm^{-1} ；N3122 铋玻璃 1053 nm 损耗为 0.15 $\%\text{cm}^{-1}$ 的样品增益系数平均值为 0.0383 cm^{-1} ，这两组结果与其他组数据相比均有

表 4 不同小信号增益系数范围内荧光寿命和 1053 nm 损耗的平均值

Table 4 Lifetime and average loss at 1053 nm of different small signal gain coefficients

Gain coefficients / cm^{-1}	N3130			
	0.0423~0.0419	0.0418~0.0416	0.0415~0.0410	
Average fluorescence lifetime / μs	330.5	330.0	330.5	
Average loss at 1053 nm / ($\%\text{cm}^{-1}$)	0.119	0.116	0.126	
Gain coefficients / cm^{-1}	N3122			
	0.0397~0.0395	0.0394~0.0390	0.0389~0.0386	0.0385~0.0382
Average fluorescence lifetime / μs	348.3	346.7	348.0	347.0
Average loss at 1053 nm / ($\%\text{cm}^{-1}$)	0.117	0.122	0.121	0.124

从表 4 的分析结果看出，对于 N3130 铋玻璃，小信号增益系数最大值一组，即 0.0423~0.0419 cm^{-1} ，荧光寿命平均值为 330.5 μs ，是 3 组数据中相对高的；而 1053 nm 损耗平均值为 0.119 $\%\text{cm}^{-1}$ 。对于 N3122 铋玻璃，小信号增益系数最大值一组，即 0.0397~0.0395 cm^{-1} ，荧光寿命为 348.3 μs ，为 4 组中最大值，而 1053 nm 损耗平均值为 0.117 $\%\text{cm}^{-1}$ ，为 4 组中最小值。从表中可以看

出，当假定两种铋玻璃的荧光寿命一致时，随着 1053 nm 损耗平均值的增加，小信号增益系数是逐渐减小的。

张华等^[10]的研究结果显示，当铋玻璃 1053 nm 损耗接近时，且受激发射截面不变的情况下，荧光寿命对小信号增益的影响是明显的，当铋玻璃荧光寿命增加 10% 时，小信号增益系数可以增加 5% 左右。从理论分析也可得出近似结果^[11]。

在假设钕离子下能级粒子密度为零时(对于四能级系统),增益介质的小信号增益系数确定为

$$g = \sigma n_2, \quad (2)$$

式中 σ 为发射截面。由于 σ 为材料参数,需要确定的仅是上能级粒子密度 n_2 。在激光通过前,放大器中上能级粒子密度表示为

$$\frac{dn_2}{dt} = \omega n_0 - \frac{n_2}{\tau}, \quad (3)$$

式中 ω 为抽运强度, τ 为介质荧光寿命。(3) 式描述了 n_2 随抽运和荧光寿命变化的情况。对于氙灯抽运的情况,电流大多为类似高斯型曲线,此时 ω 为变化项,需数值求解(3) 式。根据典型氙灯放电波形和参数,计算了不同荧光寿命下的 n_2 值,荧光寿命已做归一化处理,如图 3 所示。

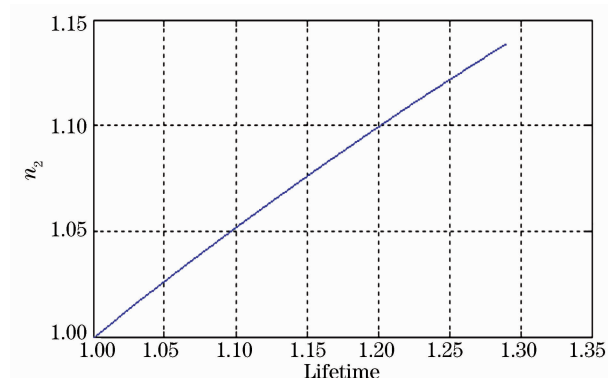


图 3 上能级粒子密度和荧光寿命的关系

Fig. 3 Relationship between particle density in upper level and lifetime

由图 3 可得,上能级粒子密度和荧光寿命成正比,但比例系数不是 1。比例系数主要和抽运波形有关系。分析不同阶数高斯型波形和比例系数关系如图 4 所示。

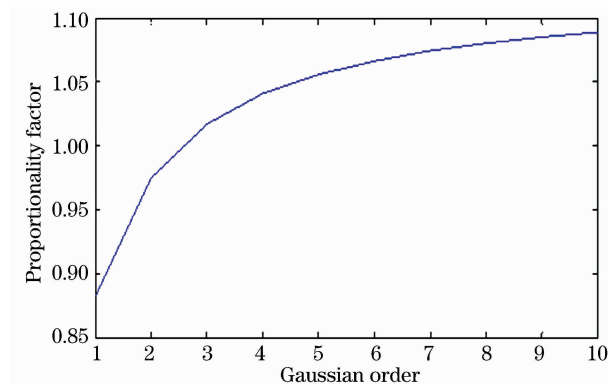


图 4 高斯阶数和比例系数的关系

Fig. 4 Relationship between Gaussian order and scale coefficient

按照以上分析,小信号增益系数和荧光寿命的

关系为线性关系,而比例系数则取决于抽运波形。对于一般的高斯型电流脉冲,比例系数小于 1,也就是说,荧光寿命如果提高 5%,小信号增益系数并不能相应提高 5%,按照图 4 显示,标准高斯脉冲($m = 1$)时可以提高 4.4%。

按照张华等的研究结果,本实验中的两种钕玻璃的荧光寿命波动范围分别为 3% 和 4%,那么小信号增益系数的波动范围应该在 1.5% 和 2%。实验中得到的小信号增益系数波动范围为 0.76% 和 0.86%,小于所推测的结果。原因应该是多方面的,首先与本工作所采用的实验方案有关,其次(2)式所描述的情况为发射截面 σ 为常数,而实际上当荧光寿命增加时,发射截面 σ 会减小,所以当样品荧光寿命增加时,实际测试所得小信号增益系数不会有理论分析得到的结果大。综合来看,本实验所得到的实验结果可以证明 N31 钕玻璃的增益一致性是完全可靠的。

4 结 论

在神光 II 系列装置建设过程中,系统精密化是重要目标之一。在此背景下,平衡各路激光输出的一致性,同时获得高增益就显得尤为重要。以此为目的,测试了每一片用于神光 II 装置中钕玻璃的小信号增益系数。测试结果表明,对于 N3130 钕玻璃,当荧光寿命在 335~325 μs , 1053 nm 损耗不超过 0.15% cm^{-1} 时,小信号增益系数平均值为 0.0417 cm^{-1} ,样品间测试值起伏范围为 0.76%。对于 N3122 钕玻璃,当荧光寿命在 355~340 μs , 1053 nm 损耗不超过 0.15% cm^{-1} 时,小信号增益系数平均值为 0.0387%,样品间测试值的起伏范围为 0.86%。这项工作充分表明,N31 型钕玻璃的增益一致性水平完全可以满足神光 II 系列装置的设计要求。

参 考 文 献

- 1 Deng Qinghua, Ding Lei, He Shaobo *et al.*. Evaluating specifications on coupled pump distribution in LDA side-pumped rod gain medium [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1176~1181
邓青华,丁磊,贺少勃等. 激光二极管阵列侧面抽运棒状增益介质抽运储能分布的评价方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1176~1181
- 2 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Gao Songxin *et al.*. Laser diode array pumped high-gain Nd glass rod amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 70~76
邓青华,彭翰生,高松信等. 激光二极管阵列抽运高增益钕玻璃棒状放大器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 70~76
- 3 Zhang Ying, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua *et al.*. Spectral shaping in

- high-power Nd: glass chirped pulse amplification system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9):1767~1771
- 张 颖,魏晓峰,朱启华 等. 高功率钕玻璃啁啾脉冲放大系统光谱整形[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9):1767~1771
- 4 Jiang Zhonghong. AICF laser glasses [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1165~1176
- 姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1165~1176
- 5 T. I. Suratwala, J. H. Campbell, P. E. Miller *et al.*. Phosphate laser glass for NIF: production status, slab selection and recent technical advances [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:102~113
- 6 N. G. Bondrenko, I. V. Eremina, A. I. Makarov *et al.*. Amplifiers for neodymium laser systems with a homogeneous distribution of the gain [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1981, **11**(9):1252~1254
- 7 D. M. Pennington, D. Milam, D. Eimerl. Gain saturation studies in LG-750 and LG-770 amplifier glass [C]. *2nd Annual International Conference on Solid-State Lasers for Applications to Inertial Confinement Fusion*, 1996, **3047**:630~642
- 8 J. H. Campbell, T. I. Suratwala. Nd-doped phosphate glasses for high-energy/high-peak-power lasers [J]. *J. Non-Cry. Solids*, 2000, **263**(1-4):318~341
- 9 J. H. Campbell, R. Hawley-Fedder, C. J. Stolz *et al.*. NIF optical materials and fabrication technologies: an overview [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:84~101
- 10 Zhang Hua, Huang Guosong, Xu Shixiang *et al.*. The influence of fluorescence lifetime and loss in phosphate laser glass on its gain property [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, **A18**(9):1186~1191
- 张 华,黄国松,徐世祥 等. 磷酸盐钕玻璃的荧光寿命和损耗对激光增益特性的影响[J]. *中国激光*, 1998, **A18**(9):1186~1191
- 11 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong. Principles of Laser [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007
- 周炳坤,高以智,陈倜嵘. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007