

400 mm 口径片状放大器 JG2 钕玻璃增益与 激光输出性能实验研究

陈 林^{1,2}, 吴文龙², 赵军普², 王振国², 柳 强¹

(1. 清华大学精密仪器系, 北京 100084;
2. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要: 介绍了用于惯性约束聚变研究高功率激光驱动装置 400 mm 口径片状放大器系统的 JG2 钕玻璃片激光增益与激光输出性能等实验研究结果。利用一组三片长的 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器系统开展的增益性能实验结果表明, 系统工作电压 31 kV 时小信号净增益系数达到 5.37%/cm, 小信号增益倍数为 1.284 倍/片/程, 发次运行完成后利用 0.3 m/s 的洁净干燥气体进行冷却, 热恢复时间约为 2 h; 利用大口径高通量验证实验平台开展的实验结果表明, 基于 JG2 与 N41 钕玻璃片的优化组合使用最高输出能量达到 21.3 kJ/1053 nm, 目前已稳定运行 500 余发, 未出现包边胶层异常与材料体损伤等故障。

关键词: 400 mm 口径片状放大器; 小信号增益系数; 激光输出能力; 实验研究
中图分类号: TN244; TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200461

Gain and laser output performance of JG2 Nd: glass in 400 mm aperture slab amplifier

Chen Lin^{1,2}, Wu Wenlong², Zhao Junpu², Wang Zhenguo², Liu Qiang¹

(1. Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering and Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The experiment result of gain performance of JG2 Nd:glass and the output of whole furniture was introduced which would be applied in 400 mm aperture slab amplifiers from high power inertial confinement fusion laser equipment. A 4×2 combined slab amplifier system of three-pieces-length and 400 mm-aperture was used to study the gain function. The gain and output experiment results of JG2 Nd: glass show that the small signal gain coefficient reaches 5.37%/cm, and the gain multiple of small signal is 1.284 times/pass when the system operating voltage is 31 kV. The thermal recovery time is about 2 h after cooling with clean and dry gas at a velocity of 0.3 m/s. Besides, experimental results acquired by Integration-Test-Bed (ITB) laser facility show that the optimal combination of JG2 and N41 Nd: glass reaches the maximum output energy of 21.3 kJ/1053 nm, and has been operated stably for more than 500 shots, without any faults such as abnormal cladding layer and material body damage.

Key words: 400 mm aperture slab amplifier; small signal gain coefficient; laser output performance; experimental study

收稿日期:2020-11-30; 修订日期:2021-02-08

作者简介:陈林,男,副研究员,博士生,主要从事高功率固体激光技术方面的研究

导师简介:柳强,男,教授,博士,主要从事全固态激光及非线性光学频率变换技术方面的研究。

0 引言

目前用于惯性约束聚变研究的高功率激光装置如美国的国家点火装置 (NIF)、法国兆焦耳激光装置 (LMJ) 等均采用了氙灯泵浦钕玻璃片的 400 mm 口径片状放大器系统^[1-3], 钕玻璃片与主激光呈布儒斯特角放置, 可提供 400 mm×400 mm 的正方形通光口径, 可将百 mJ 量级的 1053 nm 种子光放大至 20000 J 左右。钕玻璃片是片状放大器系统的核心组件之一, 其特性参数对整个装置的激光输出特性有着直接而重要的影响: 比如钕玻璃片掺杂浓度、吸收损耗、上能级荧光寿命、1053 nm 线性折射率、受激发射截面、包边剩余反射率等激光物理参数将影响装置的增益能力^[4-7]; 钕玻璃片波面质量、表面质量、光学均匀性、非线性折射率系数等将影响激光输出能量与光束质量^[8-10]; 钕玻璃片化学稳定性、损伤特性与包边寿命将影响整个装置的可靠性^[11-13]; 钕玻璃的热导率、线膨胀系数等将影响装置的运行频率^[14]。

文中介绍了用于高功率大能量激光装置的新型 JG2 钕玻璃片的增益与激光输出性能的实验研究结果, 钕玻璃片尺寸为 810 mm×460 mm×40 mm, 其小信号净增益系数为 5.37%/cm, 小信号增益倍数为 1.284 倍/片/程, 热恢复时间约为 2 h, 最高输出能量达到 21.3 kJ/1053 nm。

1 实验研究结果

1.1 增益性能

JG2 钕玻璃为典型四能级固体激光增益介质, 主要用于脉冲激光放大, 基本激光物理参数如表 1 所示, 具有高储能、1053 nm 吸收损耗低、非线性折射率系数低等特点, 尺寸为 810 mm×460 mm×40 mm, 四周各有约 12 mm 厚度的包边用于吸收放大自发辐射荧光。

用于增益性能实验研究的装置为一组三片长的 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器, 如图 1 所示。放大器高度方向为四片钕玻璃片叠加, 形成四个通光子口径, 宽度方向有两个通光子口径, 总体形成 4×2 的通光口径, 氙灯从两侧对钕玻璃片进行泵浦。为提高氙灯光利用率, 侧灯箱采用了镀银渐开线反射器, 中灯箱采用了镀银菱形反射器, 对 400~1000 nm

表 1 JG2 钕玻璃主要激光物理参数

Tab.1 Main laser physical parameters of JG2

Nd:glass	
Parameter	Value
Typical size/mm ³	810×460×40
Thickness of cladding glass/mm	~12
Coefficient of absorption of cladding glass (1053 nm)/cm ⁻¹	2.8±0.2
Nd concentration/10 ²⁰ ions·cm ⁻³	4.2±0.1
Cross section/10 ⁻²⁰ cm ²	3.6±0.1
Fluorescence lifetime/μs	305
<i>n</i> linear refractive index (1053 nm)	1.520
<i>n</i> 2 nonlinear refractive index/10 ⁻¹³ esu	1.05

氙灯光平均反射率约为 92%。隔板玻璃置于灯箱与钕玻璃片之间, 镀有宽带的增透膜, 对 400~1000 nm 氙灯光平均透过率约为 96%。发次完成后气流从顶部至底部进行吹扫和冷却, 实现洁净与热效应的快速恢复。装置基本方案如表 2 所示 (1 Torr = 133.322 Pa)。

JG2 钕玻璃的增益储能动力学过程^[15]如公式 (1) 所示。将整个钕玻璃片空间上划分为 *N* 个网格, 整个泵浦过程分割为时间步长为 Δt 的片段。钕玻璃激光介质在吸收氙灯辐射的泵浦光后获得泵浦储能 (如公式 (1) 所示) 的同时又以荧光形式随机向 4π 空间辐射能量, 在泵浦开始后 *t* 时刻介质单元 ΔV 的储能密度为 $E_{st}(x, y, z)$, 根据爱因斯坦关系, 有一部分储能会以荧光形式衰减掉, 在 Δt 间隔内自发辐射荧光 (SE) 能量密度 $E_{SE}(x, y, z)$ 如公式 (2) 所示。自发辐射荧光在经过另一体积元时, 自发辐射光被放大 (形成 ASE), 荧光的能量如公式 (3) 所示, 此时初始储能密度变为 E_{st} , 如公式 (4) 所示。

$$E_{st}(x, y, z, n+1) = (E_{st}(x, y, z, n) + W_p(x, y, z, t)\Delta t) \cdot \exp(-\Delta t/\tau) \quad (1)$$

$$E_{SE}(x, y, z, n+1) = (1 - \exp(-\Delta t/\tau)) E_{st}(x, y, z, n+1) \quad (2)$$

$$E_{ASE}(x, y, z, n+1) = E_{SE}(x, y, z, n+1) \exp[(g_0 - \alpha_{ns})d] \quad (3)$$

$$E'_{st}(x, y, z, n+1) = E_{st}(x, y, z, n+1) - \delta_E(x, y, z, n+1) \quad (4)$$

式中: τ 为钕玻璃上能级荧光寿命; α_{ns} 为钕玻璃介质对 1053 nm 工作波长的损耗系数, 主要与材料本征特性相关; g_0 为瞬态小信号增益系数, 与储能密度的关系如公式 (5) 所示:

$$g_0 = E_{st}\sigma/h\nu \quad (5)$$

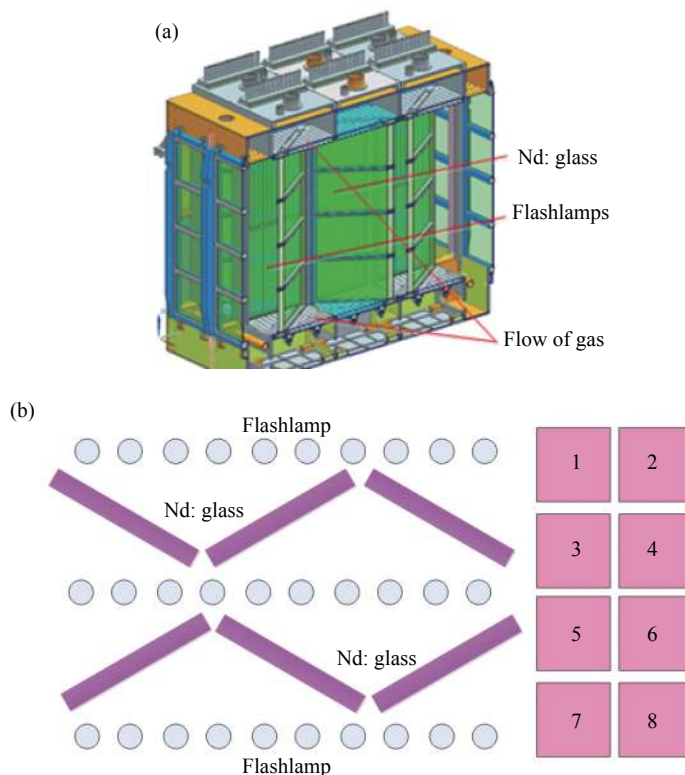


图 1 (a) 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器示意图及 (b) 剖视图

Fig.1 (a) Scheme of the 4×2 multi-slab amplifiers (MSA) with 400 mm aperture and (b) section view of the MSA

表 2 基本方案技术参数

Tab.2 Technical parameters of the scheme

Parameter	Value
Pre-ionized voltage/kV	26
Work voltage/kV	31
Peak current/kA	17
Delay between work and pre-ionization/ μ s	250
Current pulse width(10%-10%)	450
Flashlamp numbers every circuit	2
Pumping circuit numbers every amplifier	20
Flashlamp diameter/mm	37
Flashlamp arc length/mm	1 850
Flashlamp gas pressure/Torr	180

式中： σ 为钕玻璃受激发射截面； h 为普朗克常量； ν 为激光频率。

根据表 2 所示的技术方案及以上理论储能模型，计算 JG2 钕玻璃片 38.6 mm 厚度时小信号增益系数最高约为 5.35%/cm，小信号增益倍数为 1.281 倍/片/程。

小信号增益系数实验光路如图 2 所示。利用一台单模激光器作为种子光，经过整形、扩束成为 385 mm 的方形光束通过片状放大器并经腔镜反射后返回，钕玻璃安装的表面法线与种子光的夹角为 56.7°(布儒斯

特角)。

利用能量卡计 E_{in} 处测注入能量，在能量卡计 E_{out} 处测输出能量。首先调整能量卡计位置使得本底为 0(注入能量卡计与输出能量卡计在没有激光注入且放大器正常工作时读数均为 0)；然后测量静态(让激光通过放大器而放大器氙灯不工作)时的放大器的输入能量 E_{ini} 和输出能量 E_{outi} ， E_{outi} 和 E_{ini} 之比可得出静态透过率 T_i ，测试 20 组 T_i 取算术平均值，得到静态透过率 T ，如公式 (6) 所示：

$$T = \left(\sum_{i=1}^{20} T_i \right) / 20 = \left(\sum_{i=1}^{20} \frac{E_{outi}}{E_{ini}} \right) / 20 \quad (6)$$

最后测量动态(探针激光通过放大器且放大器氙灯正常工作)时的放大器的输入能量 E_{in} 和输出能量 E_{out} ，通过公式 (7) 可以得到六张钕玻璃片的平均小信号增益系数 $\bar{\beta}$ ：

$$\bar{\beta} = \frac{n}{NL\sqrt{n^2+1}} \ln \left(\frac{E_{out}}{T \times E_{in}} \right) \quad (7)$$

六片钕玻璃的净增益倍数 G 用公式 (8) 进行计算：

$$G = \frac{G_0}{T} \quad (8)$$

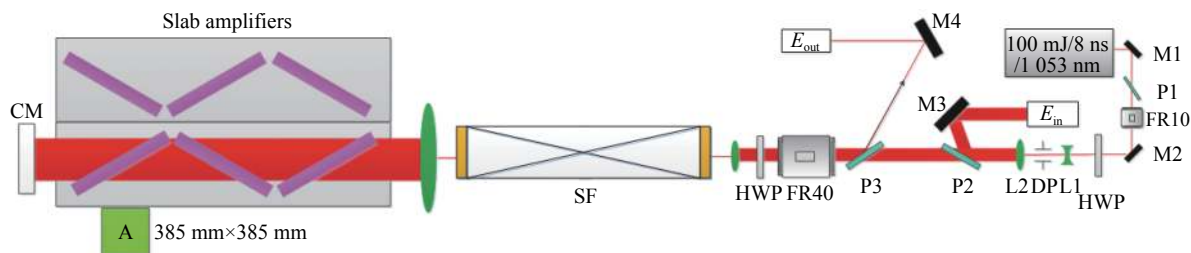


图 2 系统实验光路示意图

Fig.2 Experimental light path diagram of system

小信号增益系数 β 定义为:

$$\beta = \frac{n}{NL\sqrt{n^2+1}} \ln(G) \quad (9)$$

式中: n 为钽玻璃的折射率, $n=1.520$; L 为钽玻璃的厚度, 三片 JG2 钽玻璃片平均厚度 $L=3.86$ cm; N 为激光经过的等效钽玻璃片数, $N=6$ 。系统运行于设计工作电压为 31 kV 时, 测量光束口径为 385 mm x 385 mm, 小信号增益系数为 5.37%/cm, 小信号增益倍数为 1.28 倍/片/程, 储能密度达到 0.282 J/cm³, 与理论计算结果具有较好的一致性。

发次运行完成后利用洁净气体进行钽玻璃片吹扫冷却, 气体基本参数为洁净度 10 级 (ISO4 级)、相对湿度低于 0.1%RH、钽玻璃表面风速约为 0.3 m/s, 吹扫冷却时间为 45 min。以 2 h/发的频率连续运行六发, 六片钽玻璃片累积的动态波前畸变稳定于 $1.4 \lambda \pm 0.1 \lambda (\lambda=1053 \text{ nm})$ 范围内, 没有因多次运行累积的残余热畸变, 因此钽玻璃发次前已实现热恢复。

1.2 激光输出性能

开展输出性能研究的大口径高通量验证实验平

台为一台单束激光输出的激光装置, 与美国 NIF 装置的一束激光类似, 由前端、预放、空间滤波器、频率转换、片状放大器等分系统组成, 其主要性能参数如表 3 所示。

大口径高通量验证实验平台光路构型为“四程主放+三程助推”, 如图 3 所示。从前端 (FE) 中产生的种

表 3 大口径高通量验证实验平台主要性能参数

Tab.3 Main characteristic parameters of Integration-Test-Bed (ITB) laser facility

Parameter	Value
Number of the laser beam	1
Laser aperture	Square, max: 375 mm x 375 mm
Number of the amplifiers	Main amplifier: 9, booster amplifier: 7
Working voltage/kV	Convention: 21 kV, max: 24 kV
Work pattern	Impulse work, the interval of delivery is about 2 h
Operating wavelength/nm	1053 nm, after the frequency doubling is 351 nm
Time waveform	The typical working waveform is square pulse, and the pulse can be shaped arbitrarily

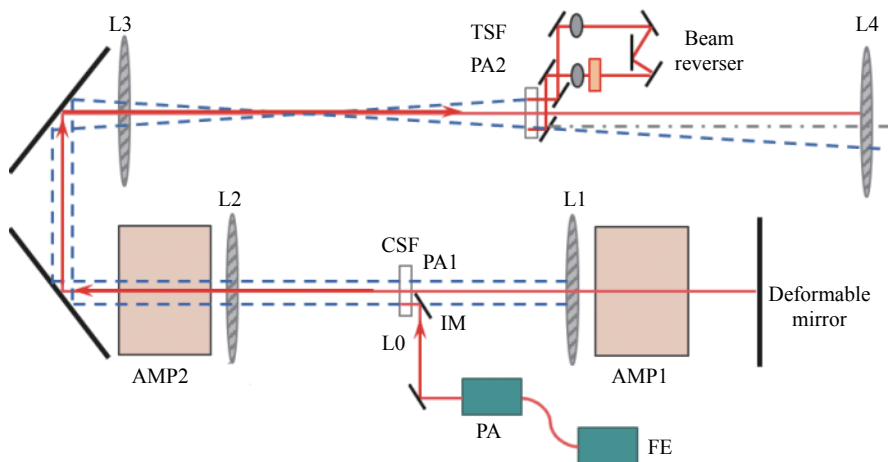


图 3 大口径高通量验证实验平台装置多程放大构型

Fig.3 Multi-pass amplified configuration of ITB laser facility

子激光经预放大器 (PA) 放大后, 经由注入透镜和 SFL1 透镜扩束后进入腔内放大器 (Main), 然后被变形镜 (Deformable mirror) 反射, 第二次经过腔内放大器, 随后经过腔内空间滤波器 (CSF) 首次进入助推放大器 (AMP2) 到达反转器 (Beam reverser) 进行光斑旋转 90° 后返回, 第二次进入助推放大器和第三次进入腔内放大器, 被变形镜反射后第四次进入腔内放大器, 第三次进入助推放大器后经由传输空间滤波器 (TSF) 单向传输后滤波后输出。整个过程中, 共计三次经过助推放大器, 四次经过腔内放大器, 等效经过 57 片钼玻璃。

三片 JG2 钼玻璃片安装于助推放大器末级, 在装置多程放大构型中等效为九片, 其余位置为 N41 钼玻璃片。JG2 钼玻璃具有储能密度大、损耗系数低、化学稳定性好等特点, 而 N41 钼玻璃具有增益能力强、非线性系数低等特点, 二者的激光物理特性接近于美国 NIF 装置组合使用的 LHG-8 钼玻璃与 LG770 钼玻璃, 可有效实现大能量激光输出。二者组合使用时, 常规运行输出激光为 18 kJ/5 ns/1053 nm 方形脉冲波形, 其典型脉冲波形与近场分布如图 4 和图 5 所示, 近场调制度 1.32 : 1, 近场对比度 0.072, 近场调制得到良好控制, 最高输出能量达到 21.3 kJ/1053 nm。经过 500 余次运行, JG2 钼玻璃未出现包边玻璃破裂及包边胶层喷胶、脱胶等异常, 钼玻璃片材料体内也未出现由于铂金颗粒、杂质、气泡等导致的炸裂等异常。

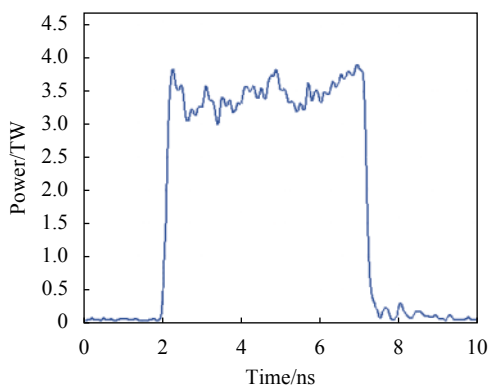


图 4 方形脉冲时间波形

Fig.4 Square pulse time waveform

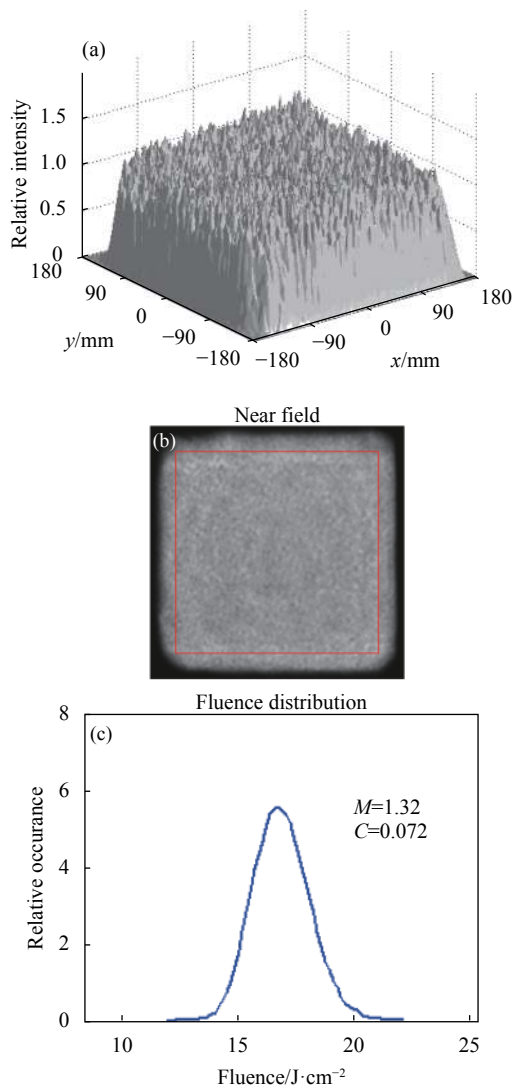


图 5 18.2 kJ/5 ns/1053 nm 主放大器输出光束近场。(a) 三维分布; (b) 二维分布; (c) 一维分布

Fig.5 Near field of laser output of the main amplifiers (18.2 kJ/5 ns/1053 nm). (a) 3-D outline; (b) 2-D outline; (c) 1-D outline

2 结 论

文中介绍了一种新型大口径 JG2 钼玻璃片的激光增益、热恢复与激光输出等激光物理性能的实验结果, 达到了与美国 NIF 装置单束激光基本一致的性能, 如表 4 所示。在 400 mm 口径 4×2 组合式片状放大器系统设计工作电压 31 kV 时, 小信号净增益系数为 5.37%/cm, 小信号增益倍数为 1.284 倍/片/程, 发次运行完成后利用风速为 0.3 m/s 的洁净气体进行冷却, 热恢复时间约为 2 h; 基于 JG2 与 N41 钼玻璃片的优化组合使用, 激光装置单束最高输出能量达到 21.3 kJ/1053 nm, 目前已稳定运行 500 余次。

表 4 主要性能参数对比

Tab.4 Comparison of main performance parameters

Parameter	JG2	NIF laser facility in USA(LHG8/LG770)
Aperture	Square, max:400 mm×400 mm	Square, max: 400 mm×400 mm
Nd concentration/ 10^{20} ions·cm ⁻³	4.2±0.1	4.2±0.1
Cross section/ 10^{-20} cm ⁻²	3.6±0.1	3.6±0.1(LHG-8);3.9±0.1(LG770)
Fluorescence lifetime/ μ s	305	≥300
Small gain coefficient/cm ⁻¹	5.37%	~5% (convention); ~5.3% (max)
Multiple of small gain/slab·pass ⁻¹	1.284	1.29
Energy density/J·cm ⁻³	0.282	0.252 (convention); 0.267 (max)
Output energy for conventional operation/kJ (1 053 nm)	18	18
Maximum output energy/kJ (1053 nm)	21.3	~22
Thermal recovery time/h	2 h (Operating frequency of the device is 4 h) (Operating frequency of the device is 4 h)	

参考文献:

[1] Spaeth M L, Manes K R, Bowers M, et al. National ignition facility laser system performance [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 366-394.

[2] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 25-145.

[3] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, et al. National ignition facility laser performance status [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276.

[4] Wen Lei, Chen Lin, Liu Jianguo, et al. Investigation on gain properties of N31 neodymium glass slab amplifiers[J], *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0402008. (in Chinese)

[5] Di Nicola J M, Bond T, Bowers M, et al. The national ignition laser performance status [C]//11th International Conference on Inertial Fusion Science and Applications, 2019. (in Chinese)

[6] 胡俊江, 陈坚, 温磊, 等. 大尺寸片状激光钕玻璃包边界面超低剩余反射率检测装置和方法: 中国, 110927119A [P]. 2020-03-27.

[7] Huang Wanqing, Zhang Ying, Sun Xibo. et al. B-integral criteria for high power solid-state laser facility [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121403. (in Chinese)

[8] Cao Jun, Yang Minghong, Wei Chaoyang, et al. Effects of rogue particles on scratches of phosphate neodymium glass polishing [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1): 0116002. (in Chinese)

[9] Zhang Liyan, Li Hong, Hu Lili, et al. Structure modeling of genes in glass: composition-structure-property approach [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2019, 34(8): 885-892. (in Chinese)

[10] Cheng Jimeng, Zhou Qinling, Chen Wei, et al. The detection of platinum particles in large diameter Nd:glass blank by high power laser radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1106001. (in Chinese)

[11] Wei Xiaofeng, Zheng Wanguo, Zhang Xiaomin. Two breakthroughs in the development of high power solid-state laser technology in China [J]. *Physics*, 2018, 47(2): 73-83. (in Chinese)

[12] Li Yangliang, Shen Chao, Shao Li, et al. Automatic acquisition of dynamic characteristics of fused silicon particle ejection induced by laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0305003. (in Chinese)

[13] Wu Zhuojie, Pan Yunxiang, Zhao Jingyuan, et al. Research on laser-induced damage of K9 glass irradiated by millisecond laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0805005. (in Chinese)

[14] Wang Bingyan, Li Yangshuai, Zhang Panzheng, et al. Nd : Glass amplifier with repetition rate fabricated by flash-lamp pumping and liquid cooling method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1001007. (in Chinese)

[15] 严雄伟. 重复频率Yb:YAG激光系统ASE及能流特性研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009.