

doi: 10.3788/gzxb20164511.1114001

钕玻璃片状放大器玻璃腔的概念设计

江梦春^{1,2}, 朱健强¹, 刘志刚¹, 王利¹

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理重点实验室, 上海 201800)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:针对片状放大器片腔的洁净度问题,提出一种钕玻璃片状放大器玻璃腔的设计方案.选用滤紫外石英玻璃作为主框架的材料,对玻璃腔的结构和密封方案进行设计,并利用玻璃腔外表面镀金属材料的方式进行遮光.采用神光 II 升级主放和 $\phi 100$ 片状放大器进行不同腔体的洁净度对比试验,结果表明玻璃腔的洁净度较不锈钢腔提高了近 70%.运用光学高级系统分析程序对玻璃腔进行光线追迹,其钕玻璃泵浦比例提高了 8.84%.该方案不仅能减少腔内气溶胶的产生,还能提高钕玻璃泵浦比例.

关键词:激光器;高功率固体激光驱动器;片状放大器;结构设计;气溶胶

中图分类号:TN242

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)11-1114001-6

Conceptual Design for Glass Cavity in Nd : Glass Slab Amplifier

JIANG Meng-chun^{1,2}, ZHU Jian-qiang¹, LIU Zhi-gang¹, WANG Li¹

(1 Key Laboratory of High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

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

Abstract: To overcome the problem of cleanliness in the laser's internal cavity, a glass cavity design for a Nd:glass slab amplifier was proposed, which uses UV-stop quartz glass for its main structure. The design of the main structure of the glass cavity and the sealing are optimized, and metal-coated surfaces are used to prevent light from escaping. The cleanliness of the stainless steel cavity of the slab amplifier of the SG-II-UP laser and the glass cavity of a $\phi 100$ slab amplifier were compared; the cleanliness of the glass cavity was found to be 70% better than that of the stainless cavity. Further, advanced system analysis program was used to simulate the designed amplifier, with the pumping ratio of the Nd:glass in the glass cavity being increased by 8.84%. Thus, the glass cavity decreases the production of aerosols and enhances the pumping ratio of the Nd : glass.

Key words: Laser; High power solid-state laser driver; Slab amplifier; Structural design; Aerosol particle

OCIS Codes: 140.3280; 140.3580; 230.4480

0 引言

惯性约束核聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)的研究对解决能源危机问题意义重大.20世纪60年代初,苏联科学家巴索夫和我国科学家王淦昌院士分别提出激光打靶实现核聚变的设想,高功率固体激

光驱动器是迄今为止国际公认的用于ICF物理研究最成熟的激光驱动器^[1-3].经过半个世纪的发展,激光驱动器的规模不断扩大,光通量逐步提升.目前,正在使用和建造中的ICF激光装置主要有美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)^[4]、法国兆焦耳激光装置(Laser Magajoule, LMJ)^[5]和中国的“神光 II”^[6]、“神光

基金项目:国家自然科学基金(No. 61405211)和惯性约束聚变能源先期关键技术合作研究(No. 2012DFG62040)资助

第一作者:江梦春(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为高功率激光放大器的设计. Email: mengchun.jiang@hotmail.com

导师(通讯作者):朱健强(1964-),男,研究员,博导,主要研究方向为激光器件设计、光学精密机械设计与制造工艺等. Email: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

收稿日期:2016-05-11;录用日期:2016-06-14

<http://www.photon.ac.cn>

Ⅲ装置^[7]等. 片状放大器系统是激光驱动器中最重要的组成部分,它不仅占总工程造价很大的比例,而且其性能的好坏直接影响装置的输出能量和功率. 对于片状放大器的研究主要围绕增益性能、氙灯泵浦、放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)及洁净控制等方面展开^[8]. 其中,洁净控制很大程度上影响了激光驱动器的建设周期和运行寿命,成为制约驱动器进一步发展的重要因素^[9-10].

氙灯泵浦的组合式钕玻璃片状放大器是目前普遍采用的结构,其为面泵浦结构,钕玻璃的通光面接受高强度氙灯光(光通量约 11 J/cm^2 ,脉宽为 $400 \sim 500 \mu\text{s}$)辐照^[11]. 钕玻璃片作为片状放大器内的重要部件,其光学表面的洁净度尤为重要. 通常,片状放大器片腔内部的钕玻璃片表面会暴露在一个最大通量约为 10 J/cm^2 的纳秒级光脉冲下^[12],因此片状放大器的密封材料(如硅橡胶)、钕玻璃片包边结构的粘接材料、主框架用的不锈钢金属材料以及光清洗后内部的残留杂质颗粒等在高强度氙灯辐照下会产生热分解作用,并释放大量的气溶胶颗粒. 此外,由于气溶胶的直径非常小(亚微米~微米量级),在缓慢沉降过程中容易附着在钕玻璃片表面,造成表面污染,并在随后的强光作用下诱导元件表面损伤影响通光质量和强度,同时对钕玻璃片的寿命及整个激光装置的运行维护造成一定影响^[11, 13-14].

美国的NIF装置和我国的神光装置通过密封、优化洁净处理工艺、规范洁净控制等方法来保证片腔内部的初始洁净度. 程晓锋等^[10]介绍了神光主机装置片状放大器洁净度提升所采取的技术途径;於海武等^[11]证明了氙灯放电结束后片腔的洁净度达到了 $10 \text{ 万} \sim 50 \text{ 万级}$ 气溶胶水平,利用大气流量的超纯氮气冲洗片腔,能有效地提高片腔的洁净度. 美国联邦标准209E^[15]用气溶胶水平来描述放大器片腔洁净度. 经过氮气吹扫和一定时间的稳定后,NIF片腔的洁净度能达到数十级气溶胶水平,而神光装置受到国内工艺条件和表面处理技术等因素的限制,其片腔的洁净度为百级气溶胶水平^[11, 16].

本文针对片状放大器系统的洁净问题,提出了一种新型的钕玻璃片状放大器玻璃腔设计方案,采用滤紫外石英玻璃作为片状放大器的主腔体,减少了橡胶密封材料,设计了合理的遮光方式,从而降低了气溶胶的产生. 该方案在放大器的结构和选材方面对气溶胶的产生进行控制,同时全明玻璃增加了氙灯的泵浦面积,增加了激光脉冲能量增益.

1 不锈钢腔与玻璃腔

一般来说,片状放大器主要包括:钕玻璃镜框组件(含工作介质)、氙灯组件、主框架、隔板玻璃、端镜组

件、冷却气路、能源供电模块、级间密封等^[17-20]. 神光Ⅱ装置中的片状放大器一般采用不锈钢金属材料作为主框架,如图1. 不锈钢金属主框架须在有氙灯泵浦辐照的方向上开设通光窗口,并嵌套隔板玻璃,由于钕玻璃工作时的洁净度要求,不锈钢金属主框架与隔板玻璃间连接时需采用耐高低温的硅橡胶密封条进行严格密封. 神光Ⅱ第9路装置中的 $\phi 100$ 片状放大器如图2,采用了滤紫外石英玻璃作为主框架,规避了框架与隔板玻璃的密封圈,同时玻璃表面比金属表面更易达到较好的洁净度,并获得了更大的辐照面积.

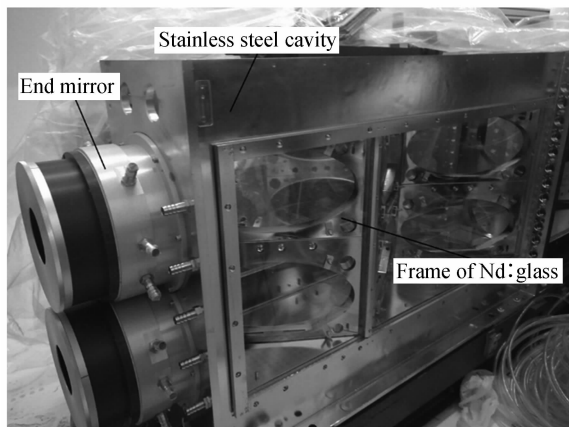


图1 神光Ⅱ片状放大器的不锈钢片腔
Fig. 1 Stainless steel cavity of slab amplifier in SG-Ⅱ

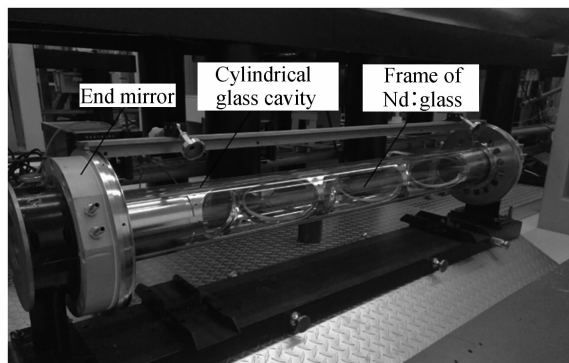


图2 $\phi 100$ 片状放大器的圆柱形玻璃腔
Fig. 2 Cylindrical glass cavity of $\phi 100$ slab amplifier

不同腔体间,片腔内部主要的气溶胶来源见表1. 相较于不锈钢腔,玻璃腔内气溶胶的来源更少,产生的气溶胶也更少,更易维持片腔内部较好的洁净度.

玻璃腔的制造主要采用熔接成型、磨削加工的方法,其加工成本比不锈钢腔体略高,但容易获得更好的表面粗糙度,表面残留有机物也更少. 同时,不锈钢的导热系数为 $10 \sim 30 \text{ W/(m} \cdot \text{k)}$,石英玻璃的导热系数为 $1.46 \text{ W/(m} \cdot \text{k)}$,两者的散热效果均不理想,因此不锈钢腔体和玻璃腔体主要依靠氮气吹扫来达到散热的目的. 此外,石英玻璃的抗压强度为 1 100 MPa ,抗弯强度为 67 MPa ,因此在设计片状放大器的玻璃腔时,须考虑其支撑结构.

表 1 片腔内气溶胶的来源

Table 1 Source of aerosols in internal cavity

Source of aerosol	Stainless steel cavity	Glass cavity	
Residual organic material in surface	✓	✓ (less)	
Chemical film	✓	✓	
Impurities in purge gas	✓	✓	
Binding material of Nd : glass edge cladding	✓	✓	
Between main structure and amplifier blast shields	✓	×	
Seal rings	Between main structure and end mirrors	✓	✓
	Between main structure and xenon lamp boxes	✓	✓
Others	✓	✓	

2 钕玻璃片状放大器玻璃腔的结构

针对神光 II 升级装置中 2×2 组合式片状放大器的一个放大器单元,所设计的钕玻璃片状放大器玻璃腔如图 3,主要包括:玻璃腔主框架、玻璃腔内框顶盖、玻璃腔内框底座、边框和支撑杆。

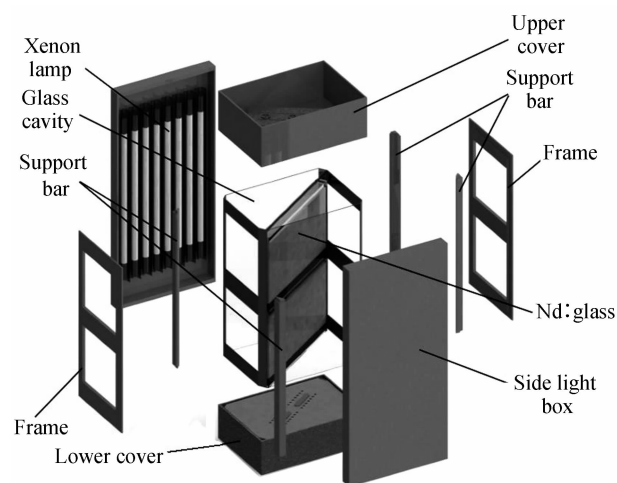


图 3 钕玻璃片状放大器玻璃腔

Fig. 3 Glass cavity of Nd : glass slab amplifier

2.1 片状放大器玻璃腔主框架设计

钕玻璃片状放大器玻璃腔主框架如图 4,片状放大器中的工作介质在紫外线的辐照下会产生色心,降低激光输出效率,因此选用滤紫外石英玻璃作为主要材料^[21]。由于该腔体为环形玻璃结构,氙灯辐照面无需隔板玻璃窗口,减少了橡胶密封材料;在玻璃腔的外表面(除两个氙灯泵浦面)、上周缘表面和下周缘表面镀金属材料,防止光线外溢,进一步降低了气溶胶产生。

在主框架的四个顶角处设计相应的支撑杆,减小顶盖对玻璃腔的压力,提高装置的稳定性。在不干涉片

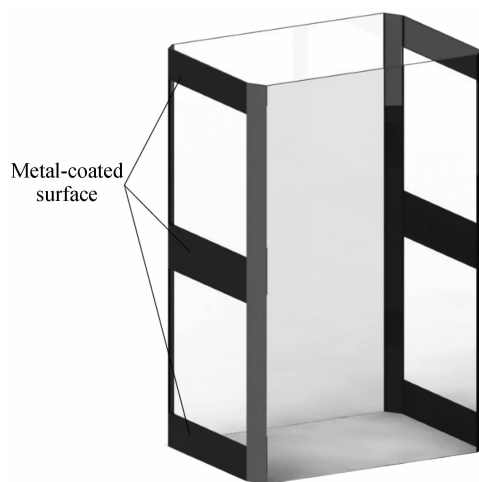


图 4 钕玻璃片状放大器玻璃腔主框架

Fig. 4 Main structure of glass cavity of Nd : glass slab amplifier

腔内部的钕玻璃镜框组件(含工作介质)、顶部和底部的反射器的情况下,框架的顶角有两种设计方案:1)斜角过渡;2)圆弧倒角过渡。两者横截面图如图 5。由于玻璃加工半径 5 mm 以上的圆角难度较大,费用较高,而且加工后的支撑杆与玻璃框架可能无法紧密贴合,导致后续无法安装。而方案 1)中的斜角过渡可以采用三片玻璃熔接而成,该方案切实可行。同时,斜面的引入增加了各支撑杆的横截面积,提高了装置的稳定性,使装置结构更为紧凑。

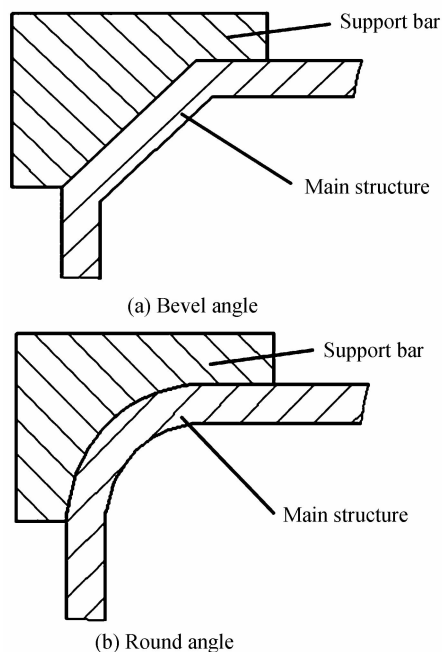


图 5 支撑杆的横截面

Fig. 5 Cross-section view of support bar

组合式片状放大器中,一个放大器单元允许上下两束激光光束并行通过,故沿光路在玻璃框架的对应位置开设通光孔,并在片状放大器主框架外侧设计相应开口的边框(如图 3),用来组装端镜组件。此外,边

框的存在也有利于装置稳定性的提高。

2.2 顶盖和底座设计

所设计的钕玻璃片状放大器玻璃腔中,玻璃腔内框顶盖和底座结构类似,都为—个整框,用螺钉将四边与底板连接后焊接而成,如图6。采用整块的玻璃反射板(下表面镀金属)代替不锈钢腔中的两片三角反射板,置于底板上方。玻璃反射板能够增大反射面积,减少腔内的金属面积。在底板及玻璃反射板上沿着钕玻璃镜框组件的两侧开通气口(顶盖为进气口,底盖为排气口),便于腔内的冷却及清扫。

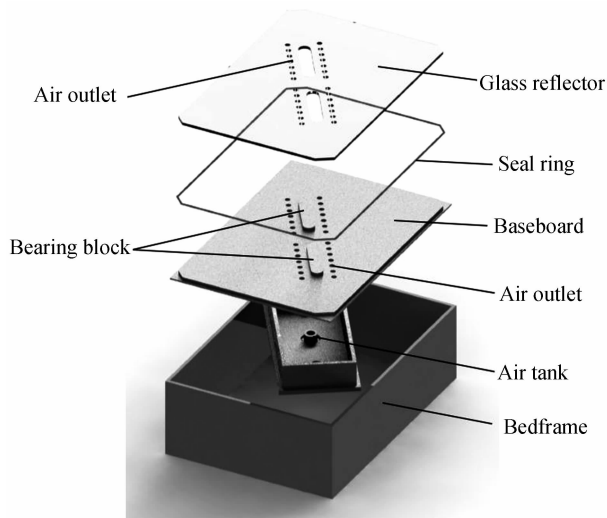


图6 玻璃腔内框底座

Fig. 6 Lower cover of glass cavity

图6中,O型圈套入玻璃腔内框底座的凹槽内,玻璃腔主框架的下周缘与之贴合,采用上下压紧的方式进行密封。由于其下周缘表面镀有金属材料,尽量避免了腔内光线照射到密封圈上,减少了气溶胶的产生。

2.3 钕玻璃镜框组件设计

如图7,钕玻璃镜框设计为插拔式的全玻璃组件,在镜框的侧面沿激光光束的方向开设通光孔,进一步减少了腔内的金属挡光面积,同时减轻了钕玻璃镜框组件的重量。

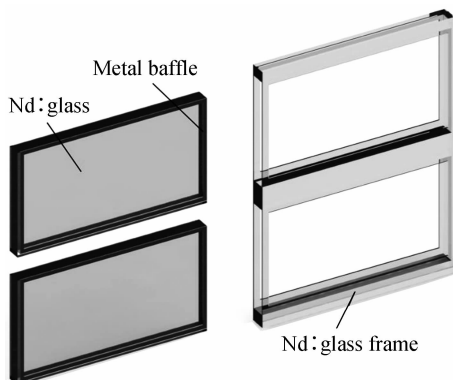


图7 钕玻璃镜框组件

Fig. 7 Structure of Nd:glass frame

2.4 密封方案设计

片腔内部有较为严苛的洁净度要求,因此需要充分考虑放大器的密封性能。对于所设计的钕玻璃片状放大器玻璃腔,主要考虑玻璃腔与金属件的密封、金属与金属件的密封。玻璃腔与金属件的密封:1)玻璃腔和顶盖、底座间的密封如2.2节中所述;2)玻璃腔与玻璃腔边框的密封,边框上开设密封槽,并嵌入密封圈密封。金属与金属件的密封:1)玻璃腔边框与顶盖、底座间采用密封条密封,并用螺丝固定;2)侧灯箱悬挂于氙灯泵浦面两侧,其四边分别与顶盖、底座和两侧支撑杆间用密封条密封。

3 实验和仿真

3.1 洁净度对比

为了证明玻璃腔体的优越性,采用神光II升级的主放(不锈钢腔)和 $\phi 100$ 片状放大器(玻璃腔)进行不同材料的腔体洁净度对比试验。试验中,采用的氮气纯度为99.995%(含氮量 <10 ppm, $H_2O < 1$ ppm,杂质 <5 ppm)。经氮气吹扫并一段时间稳定后,将尘埃粒子计数器(日本加野麦克斯KANOMAX3886)与片状放大器的排气口相连,通过测量片状放大器片腔内悬浮粒子浓度来给出片腔的洁净度,腔内所达到的指标如表2。玻璃腔的洁净度较不锈钢腔的洁净度提高了近70%,这是由于玻璃腔内的金属面积少,腔内的表面残留有机物降低,而且所需密封圈的数量减少,从源头上降低了气溶胶的产生。

表2 不同腔体洁净度对比

Cavity	Stainless steel cavity of slab amplifier in SG-II-UP	Glass cavity in $\phi 100$ slab amplifier
Cleanliness	Class 100	Class 30~40

3.2 钕玻璃泵浦比例分析

利用光学高级系统分析程序(Advanced System Analysis Program, ASAP),采用光线追迹方法模拟了两种腔体中钕玻璃内部的泵浦沉积情况(这里仅考虑不同腔体的情况,其钕玻璃镜框组件都为不锈钢)。两种腔体中氙灯的数目和输入能量相同,钕玻璃片的参量相同。追迹过程中当光线携带的能量降低到可忽略水平后就停止追迹,每条光线允许不超过12次的反射。根据上述假设条件,钕玻璃泵浦比例(钕玻璃中的沉积的泵浦和入射的总泵浦之比)的模拟结果如图8,玻璃腔中钕玻璃泵浦比例为9.85%,不锈钢腔中钕玻璃泵浦比例为9.08%。对于所建立的模型,玻璃腔中钕玻璃泵浦比例比不锈钢腔提高了

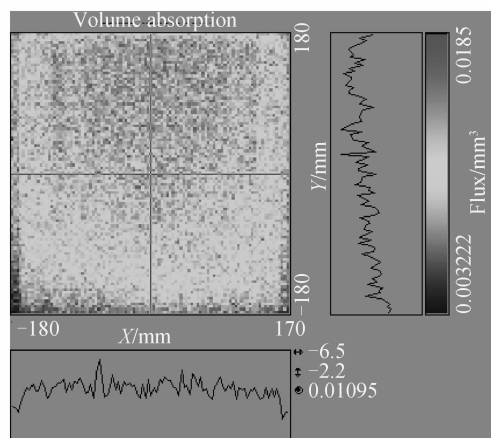
$$\Delta_{\text{pump}} = \frac{9.85\% - 9.08\%}{9.08\%} \times 100\% = 8.48\% \quad (1)$$

神光II升级的隔板玻璃通光窗口面积为 $570 \times$

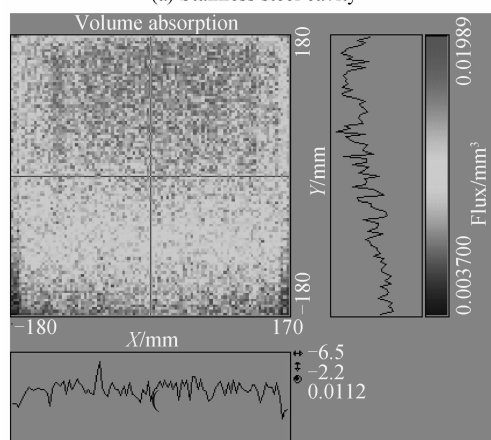
840 = 478 800 mm², 所设计的玻璃腔的通光面积为 972.5 × 592 = 575 720 mm², 氙灯泵浦的面积提高了

$$\Delta_{\text{area}} = \frac{575720 - 478800}{478800} \times 100\% = 20.24\% \quad (2)$$

同时玻璃材料镀膜容易, 有利于提高光线的反射率及利用率。但是由于在不锈钢腔中, 反射器和窗口已占据非常大的比例, 因此, 单个片状放大器玻璃腔单元中的钎玻璃泵浦比例的提升效果有限。若将玻璃腔推广到组合口径的放大器中, 其泵浦比例能获得更好地提升。



(a) Stainless steel cavity



(b) Glass cavity

图 8 钎玻璃泵浦比例

Fig. 8 Pumping ratio of Nd : glass

4 结论

针对片腔内部在强光辐照下释放大量气溶胶的问题, 提出了一种新型的钎玻璃片状放大器玻璃腔的设计方案。神光 II 升级中主放和 φ100 片状放大器的洁净度对比结果表明, 采用了玻璃腔的 φ100 片状放大器的洁净度较不锈钢腔的洁净度提高了近 70%。相比于已有的片状放大器的不锈钢腔, 该方案能够有效地减少气溶胶的产生, 有助于延长钎玻璃片的使用寿命, 并有利于装置的运行维护, 同时该方案中钎玻璃泵浦比例提高了 8.84%。

参考文献

- [1] LIN Zun-qi. Progress of laser fusion[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, **37**(9): 2202-2207.
林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2202-2207.
- [2] ZHU Jian-qiang. Chinese laser—SG-II laser facility[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, **28**(5): 271-273.
朱健强. 中国的神光——神光 II 高功率激光实验装置[J]. *自然杂志*, 2006, **28**(5): 271-273.
- [3] SUN Qun, ZHOU Jing-lun, WEI Xiao-feng, et al. System reliability research about the inertial confinement fusion laser driver[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(1): 12-15.
孙权, 周经伦, 魏晓峰, 等. 惯性约束聚变激光装置系统可靠性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(1): 12-15.
- [4] PAISNER J A, BOYES J D, KUMPAN S A, et al. Conceptual design of the National Ignition Facility[C]. SPIE, 1995, **2633**: 2-12.
- [5] YE Qing. Overview of laser megajoule [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000, **37**(7): 4-6.
叶青. 法国惯性约束聚变计划概述[J]. *激光与光电子学进展*, 2000, **37**(7): 4-6.
- [6] YIN Bing-yu, LI Guo-yang, LI Xue-chun, et al. High power laser facility front-end energy control system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(4): 0414001.
殷冰雨, 李国杨, 李学春, 等. 高功率激光装置前端能量控制系统[J]. *光子学报*, 2014, **43**(4): 0414001.
- [7] ZHOU Hai, WU Wen-kai, LIN Dong-hui, et al. Summarization of optical-mechanical structure design of megajoule class high power laser driver [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(10): 2277-2283.
周海, 吴文凯, 林东晖, 等. 兆焦耳级高功率激光驱动器光机结构设计[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(10): 2277-2783.
- [8] ZHANG Hua, FAN Dian-yuan. Optimization of the design of high power Nd : glass laser amplifiers [J]. *Physics*, 1999, **28**(2): 19-24.
张华, 范滇元. 高功率钎玻璃激光放大器优化设计的研究现状与展望[J]. *物理*, 1999, **28**(2): 19-24.
- [9] MACILWAIN C. Laser projectfaces optics hurdle [J]. *Nature*, 1999, **401**(6750): 201-202.
- [10] CHENG Xiao-feng, WANG Hong-bin, MIAO Xin-xiang, et al. Contamination control for high-power solid-state laser driver and improvement of cleanliness in slab amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(5): 1147-1151.
程晓峰, 王洪彬, 苗心向, 等. 高功率固体激光驱动器污染控制及片状放大器洁净度改进[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(5): 1147-1151.
- [11] YU Hai-wu, ZHENG Wan-guo, TANG Jun, et al. Investigation of slab cavity cleanliness of high power laser amplifiers[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(3): 272-276.
於海武, 郑万国, 唐军, 等. 高功率激光放大器片腔洁净度实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(3): 272-276.
- [12] STOWERS I F, HORVATH J A, MENAPACE J A, et al. Achieving and maintaining cleanliness in NIF amplifiers [C]. SPIE, 1999, **3492**: 609-620.
- [13] XIE Wen-kun. Research on cleaning process and detection technology of final optic assembly [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
解文坤. 终端光学组件洁净清洗工艺及检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

- [14] HONIG J. Cleanliness improvements of national ignition facility amplifiers as compared to previous large-scale lasers [J]. *Optics*, 2004, **43**(12): 2904-2911.
- [15] Airborne particulate cleanliness classes in cleanrooms and clean zones[R]. US FED-STD-209E, 96052582.
- [16] SPAETH M L, MANES K R, HONIG J. Cleanliness for the NIF 1ω laser amplifiers [J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, **69**(1): 250-264.
- [17] HORVATH J A. NIF/LMJ prototype amplifier mechanical design [C]. SPIE, 1997, **3047**: 148-157.
- [18] WANG Cheng-cheng, YU Hai-guo, ZHOU Hai, *et al.* A new high power solid-state laser multi-segment-amplifier[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(1): 1-3.
王成程, 於海武, 周海, 等. 新型高功率固体激光阵列式片状放大器 [J]. *激光技术*, 2003, **27**(1): 1-3.
- [19] WANG Cong-yu. Study on modularized design of slab amplifier [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
王聪瑜. 片状放大器模块化技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2006.
- [20] ZHANG Pan-zheng, LIN Xian-ping, PAN Feng, *et al.* Research of grounding of high power Nd : glass disk amplifier of SG-II [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(3): 0302004.
张攀政, 林贤平, 潘峰, 等. 神光 II 高功率钕玻璃片状放大器接地实验研究 [J]. *中国激光*, 2014, **41**(3): 0302004.
- [21] LIU Guang-tong, QIU Shi-lan. Study of UV-stop quartz glass in solid-state laser[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 1985, **5**: 11-15.
刘光同, 丘世兰. 用于固体激光器的滤紫外玻璃的研制[J]. *硅酸盐通报*, 1985, **5**: 11-15.