

神光 II 高功率钕玻璃片状放大器接地实验研究

张攀政¹ 林贤平¹ 潘峰^{2*} 刘强¹ 曹兆栋³ 周申蕾¹ 陈宇渊²
马伟新³ 朱俭³ 林尊琪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联合实验室, 上海 201800
² 中国科学院上海光学精密机械研究所上海激光电源设备有限责任公司, 上海 201800
³ 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

摘要 实验研究了高功率片状放大器不接地(悬浮状态)时感应电压的变化规律,结果表明:感应电压的大小主要受到金属腔体与氙灯之间的分布电容、放大器充电电压以及氙灯数量的影响;腔体之间不产生直接影响关系。实验研究了放大器在多种接地方式下的感应特性,提出了放大器内外腔电一体化并整体接地的接地方案,并将其成功应用到了神光 II 第 9 路 $\phi 350$ mm 片状放大器中,从根本上消除了放大器内部电击穿的可能性,并将放大器的感应电压降低到悬浮状态下的 18%,提高了片状放大器运行可靠性和安全性,同时有助于改善放大器的紧凑性和洁净度。采用这种接地方案以来, $\phi 350$ mm 放大器可靠运行 400 多发次,未出现电击穿或干扰现象。

关键词 激光光学; 片状放大器; 感应电压; 接地; 可靠性

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0302004

Research of Grounding of High Power Nd:Glass Disk Amplifier of SG II

Zhang Panzheng¹ Lin Xianping¹ Pan Feng² Liu Qiang¹ Cao Zhaodong³
Zhou Shenlei¹ Chen Yuyuan² Ma Weixin³ Zhu Jian³ Lin Zunqi¹

¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Shanghai Power Equipment for laser Co. LTD, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
³ Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract The characteristics of the induced voltage of the high power disk amplifier, which is not grounding (suspended), is researched experimentally. Results show that the peak value of the induced voltage is dominated by the capacitance between the flash lamp and the cavity and the number of flash lamps in the amplifier, and the independent cavities don't affect each other directly. Experimental study on induction properties of the amplifier under a variety of grounding methods is conducted, and a grounding plan of wholly grounding the amplifier with the internal and external cavities electrically integrated is demonstrated, which is successfully applied to the $\phi 350$ mm disk amplifier of the ninth beam of SG II. The possibility of electrical breakdown inside the amplifier is eliminated radically, and the induced voltage of the amplifier is reduced to 18% of that when the amplifier is suspended. As a result, the reliability and safety of the disk amplifier are improved obviously, the compactness and cleanliness of the amplifier are also improved simultaneously. Since this grounding plan is adopted, the $\phi 350$ mm amplifiers have operated reliably and safely for more than 400 shots without any electrical breakdown and interference.

Key words laser optics; disk amplifier; induced voltage; grounding; reliability

OCIS codes 140.3280; 140.3580; 230.4480

收稿日期: 2013-08-23; 收到修改稿日期: 2013-10-05

作者简介: 张攀政(1983—),男,博士,助理研究员,主要从事高功率片状放大器方面的研究。

E-mail: nwpuzhangpanzheng@163.com

* 通信联系人。E-mail: panfengzaition1@sohu.com

1 引 言

高功率激光是惯性约束核聚变(ICF)的最主要的驱动技术之一^[1-4]。目前,国际上用于ICF研究的高功率激光驱动装置具有代表性的包括美国的国家点火装置(NIF)装置,法国的兆焦耳激光装置(LMJ)装置,日本的GEKKO-XII装置以及我国的神光II、神光III装置^[4-7]。作为高功率激光驱动装置的重要组成部分,大口径钹玻璃片状放大器^[8]提供了装置的绝大部分储能和增益^[9],对整个装置的输出性能、运行可靠性和安全性产生重要影响^[10-15]。

钹玻璃片状放大器主要由作为增益介质的钹玻璃片,作为抽运光源的高功率脉冲氙灯,放大器金属内腔(镀银反射板)和金属外腔(放大器金属框架),用于构成密封片腔的端面镜和隔板玻璃,以及能源供电模块等部分构成。能源供电模块通过LC供电回路对氙灯放电,氙灯在高压电脉冲的作用下辐射抽运光,对钹玻璃片进行抽运,产生粒子数反转分布,进而为激光信号提供增益。受到钹玻璃有限荧光寿命的影响,放大器运行瞬间供电模块需要在几百微秒以内将数十万焦耳的巨能量电脉冲传输到氙灯中,属于高压、高频、高电流峰值的瞬态过程^[14,16]。如果不进行科学的放大器接地,这一高压高频的瞬态过程很容易在放大器金属腔体中产生上万伏的瞬间感应电压,引起放大器不同腔体之间甚至放大器与光学平台等外部环境之间的电击穿。对放大器自身、抽运供电系统、放大器周边的其他仪器设备以及现场实验人员产生安全隐患的同时,还严重影响整个激光装置的运行可靠性。所以如何通过合理的放大器结构设计和有效的接地技术,降低放大器感应电压和各腔体之间的瞬态压差是保证整个激光驱动装置高效、稳定、可靠、安全运行必须解决的重要问题。

包括我国神光III装置在内,国际上大功率激光

装置的放大器接地技术通常采用将放大器的金属外腔与金属内腔分别接地的方案^[14,17]。该方案可以有效解决放大器感应电压带来的安全和可靠性问题,但需要在放大器内外腔之间加入绝缘材料进行支撑,放大器设计及加工工艺复杂,影响放大器腔结构的紧凑性,不利于放大器增益能力和抽运效率的提高。同时绝缘材料容易在氙灯光的辐照下产生大量气溶胶,不利于放大器洁净度的保持。

对片状放大器在氙灯放电瞬间的感应特性进行了系统的测试研究。测试并分析了片状放大器悬浮状态下感应电压的变化规律。实验研究了多种接地方式下片状放大器的感应特性。提出了放大器内外腔电一体化并整体接地的技术方案,并将该方案成功应用于神光II装置第9路 $\phi 350$ mm片状放大器中。在不影响放大器紧凑性、增益性能和洁净度的同时,从根本上消除了放大器内部各腔体之间电击穿的可能性,并将放大器金属腔体的感应电压降低到悬浮状态下的18%,大幅提高了系统运行的可靠性和安全性。

2 实验设备及实验内容

离线测试了片状放大器放电瞬间金属腔体感应电压的变化规律,测试实验采用神光II第9路 $\phi 200$ mm片状放大器。放大器金属腔体和抽运氙灯的结构关系如图1(a)所示,放大器外腔与内腔通过绝缘材料连接支撑,实现电绝缘,绝缘能力为40 kV。氙灯通过金属夹持件固定在灯架上,灯架与内腔电连接。实验采用氙灯的电结构如图1(b)所示,氙灯灯头绝缘能力为40kV。两只氙灯串联并与能源供电模块的一个LC供电回路连接,如图1(c)所示。采用电容分压器(CVD)测量放大器放电瞬间各部分的感应电压波形。

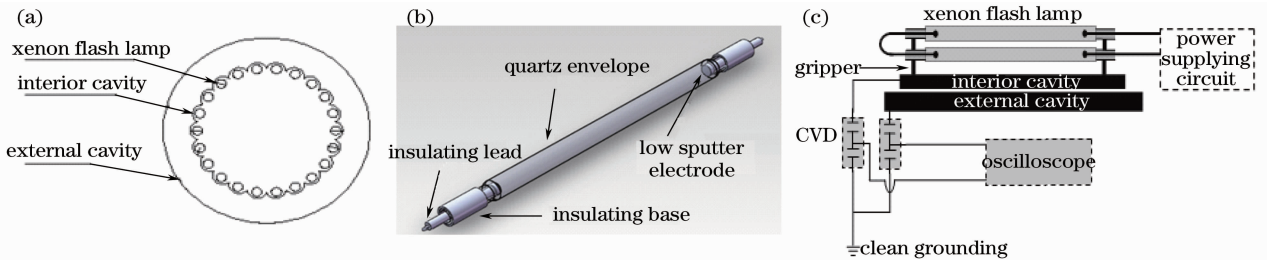


图1 放大器金属腔结构、脉冲氙灯结构及测试实验示意图。(a) 放大器金属腔和抽运氙灯的位置关系(截面图); (b) 氙灯电结构;(c) 放大器各部分连接关系及测试实验

Fig.1 Schematics of the metal disk amplifier metal cavities, the xenon flash lamp and the testing method. (a) Amplifier metal cavities structure and the relative position with xenon flash lamps (sectional view); (b) xenon flash lamp electricity structure; (c) connecting relations in the amplifier and the test method

实验测量分析了悬浮状态下,氙灯放电瞬间放大器内腔和外腔感应电压的变化规律及放大器在多种接地方式下的感应特性,提出了放大器内腔和外腔电一体化并整体接地的接地方案,并对该方案进行了可行性验证研究。最后进行了该接地方案在神光Ⅱ第9路 $\phi 350$ mm片状放大器中的在线应用实验研究。

3 悬浮状态下放大器感应电压特性

3.1 氙灯的放电特性及放电瞬间放大器的感应特性

放大器内腔和外腔电绝缘并悬浮,充电电压为

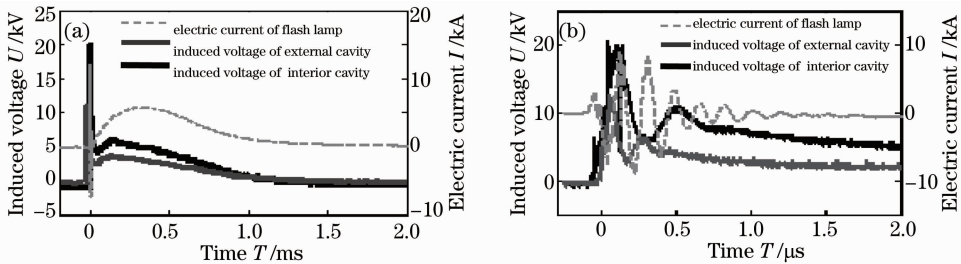


图2 氙灯放电电流波形及放大器感应电压波形图。(a) 氙灯放电波形及感应电压波形全貌;(b) 触发瞬间的细节

Fig. 2 Flash lamp discharge current pulse and the induced voltage of disk amplifier cavities.

(a) Up view of the whole current pulse and the induced voltage; (b) details on the time of triggering

与氙灯放电过程相对应,放大器的感应电压也分为两个阶段,分别是氙灯触发瞬间电流高频振荡引起的感应电压(触发感应电压)和氙灯主放电脉冲引起的感应电压(主感应电压)。二者相比,触发感应电压呈现高频振荡的特点,而主感应电压则变化相对缓慢;同时触发感应电压的峰值远远高于主感应电压的峰值,前者一般是后者的3倍左右。如图2中所示,放大器内腔的触发感应电压峰值约为20 kV,主感应电压峰值约为6 kV,外腔触发感应电压峰值约为12 kV,主感应电压峰值约为3.5 kV。

从测试结果可以看出,高功率片状放大器的氙灯放电过程属于高压高频高电流峰值的瞬态过程。这一瞬态过程导致放大器金属腔体产生很高的感应电压。容易在放大器不同金属腔体之间或放大器与实验平台之间产生电击穿,影响放大器运行可靠性,同时对实验人员和其他仪器设备造成安全隐患。

3.2 放大器感应电压的影响因素

在不同的高功率激光系统中,片状放大器腔体结构、氙灯数量及工作电压不尽相同。为了了解上述因素对放大器感应电压的影响,测试了放大器悬浮状态下不同氙灯数量、不同工作电压,不同金属腔体的感应电压。

图3为4组氙灯,充电电压为20 kV时放大器内

20 kV,测量了氙灯的放电电流波形及放大器内外腔的感应电压波形。如图2所示,氙灯放电过程主要分为非稳态过程和似稳态过程两个阶段。非稳态过程是触发瞬间氙灯内部形成电弧,为主放电脉冲打开通道的过程。似稳态过程是主放电脉冲通过氙灯,将能源供电模块的储能传输到氙灯并转化为光能的过程。非稳态过程的峰值电流可高达10 kA,且表现为高频振荡,振荡频率约为6 MHz,持续时间约为 1.5μ s。似稳态过程的主放电脉冲底宽约为 800μ s,其中脉冲前沿约为 300μ s,峰值电流为6.3 kA。

腔和外腔的感应电压对比情况。内腔和外腔的触发感应电压峰值相差6.8 kV,主脉冲感应电压峰值相差2.6 kV。这主要是因为放大器内腔与外腔相比,距离氙灯更近,内腔与氙灯之间的分布电容相对更小,所以承担了更多的压降。可以看出,放大器结构中不同金属腔体会产生不同的感应电压,大小和腔体与氙灯之间的分布电容及放大器腔体结构有关。

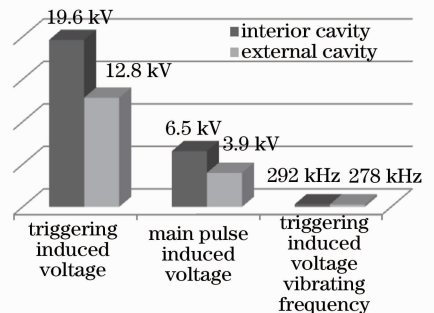


图3 放大器内腔和外腔感应电压比较

Fig. 3 Comparison of the induced voltage of the interior and external cavities of the disk amplifier

图4为放大器内腔感应电压峰值随氙灯数量和充电电压的变化关系。可以看出,触发感应电压和主感应电压都会随着充电电压的增加呈线性增长趋势,但增长速度会随着氙灯数量的不同略有差别。保持充电电压不变,氙灯数量增加,感应电压也会随着增

加,但增加幅度很小,与氙灯数量不存在比例关系。

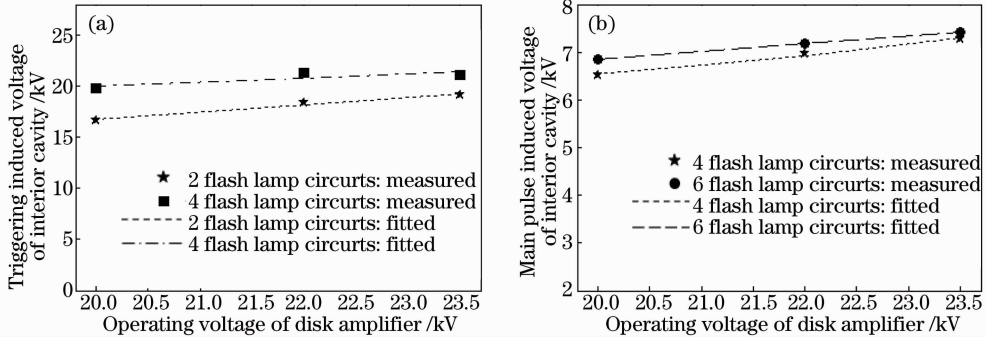


图 4 放大器内腔感应电压峰值随氙灯数量和工作电压的变化关系。(a) 触发感应电压; (b) 主感应电压
Fig. 4 Changes of the amplifier interior cavity induced voltage with the number of flash lamps and the operating voltage.

(a) Triggering induced voltage; (b) main pulse induced voltage

根据以上测试结果可以看出,在影响感应电压大小的因素中,放大器的腔体结构起着主要作用,而氙灯数量和充电电压的影响则相对较小。由于放大器在悬浮状态下相互绝缘的金属腔体之间存在较高的感应电压差,容易引起放大器内部电击穿。所以,在保证放大器与平台之间绝缘能力的同时还要保证放大器不同腔体之间具有足够的绝缘能力才能实现放大器的安全可靠运行。例如上述测试实验中使用的放大器,既要保证放大器与平台之间的绝缘能力大于 12.8 kV,又需保证放大器内腔和外腔之间的绝缘能力大于 6.8 kV。同时由于受到氙灯点火电压和放大器抽运能量的要求限制,无法通过大幅降低充电电压和氙灯数量来解决放大器感应电压的问题。所以,通过合理的腔结构设计和接地技术就成为解决放大器感应问题的主要技术手段。

放大器内外腔之间仍然需要较高的绝缘能力。如在测试实验中,放大器内外腔之间的瞬间压差可高达 19.8 kV,因此需要实现放大器内腔和外腔之间至少 19.8 kV 的绝缘能力才能确保放大器的可靠运行。为了满足这一要求,放大器内腔和外腔之间的支撑结构往往需要使用绝缘材料,同时内外腔之间的最小直线距离必须大于 16 mm(按 25 °C,50%空气湿度,实测空气直线击穿耐压能力为 1.2 kV/mm 计算)。这不仅加大了放大器机械设计和加工的难度,不利于放大器结构的紧凑性,同时绝缘材料在氙灯光辐照下会发生热分解产生大量气溶胶^[18-20],污染隔板玻璃、氙灯及内腔的镀银反射面,从而影响放大器的增益能力和抽运效率^[21-22]。

4 放大器接地实验

4.1 放大器内腔悬浮,外腔接地

放大器内腔悬浮,外腔接干净地(CG),4 组氙灯,充电电压为 20 kV,测试了放大器内腔的感应电压。从图 5 中放大器外腔接地前后内腔感应电压的对比结果可以看出,放大器外腔接地与悬浮两种状态下,内腔的触发感应电压峰值、主感应电压峰值以及触发感应电压振荡频率都几乎不发生变化。说明了放大器不同腔体的感应电压具有相对独立性,只与该腔体和氙灯之间的分布电容、充电电压及氙灯数量有关,与外层其他腔体的状态没有直接的影响关系,这一点符合第 3 节中得到的放大器感应电压的变化规律。所以,只将放大器外腔单独接地,放大器内腔和外腔之间仍然存在较高的瞬间压差,即内腔的感应电压值。为了保证放大器的可靠运行,放

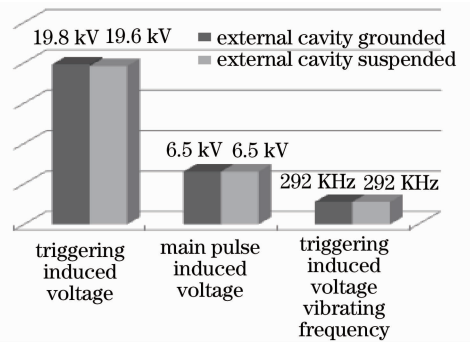


图 5 放大器外腔接地与悬浮两种状态下内腔的感应特性比较

Fig. 5 Comparison of the interior cavity induced voltages with the external cavity grounded and suspended

4.2 放大器内腔、外腔分别接地

放大器内腔连接功率地(PG),外腔连接 CG,1 组氙灯,充电电压为 20 kV,测试了放电瞬间放大器内腔相对外腔的感应压差。结果如图 6 所示,通过内外腔分别接地,放大器的感应电压得到了大幅度的降低,但内腔和外腔之间仍然存在 1.6kV 的瞬间

压差。所以,放大器内外腔之间的支撑结构仍然需要采用绝缘材料,无法解决放大器设计加工复杂和容易引起腔内洁净度下降的问题。

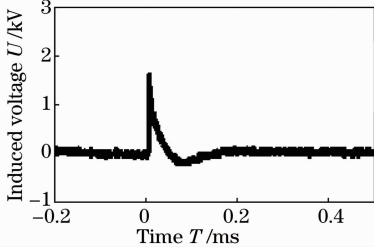


图6 放大器内腔和外腔的感应电压差

Fig. 6 Induced voltage difference between the interior and the external cavities of the amplifier

4.3 放大器内外腔电一体化并整体接地

针对以上两种接地方案的测试结果和存在的问题,提出了放大器内腔和外腔电一体化并整体接地的方案,即放大器内腔和外腔电连接,消除放大器各部分金属腔体之间的分布电容,使整个放大器的金属结构成为一个等电位体,同时将该等电位体连接CG。离线测试实验中采用1组氙灯,充电电压为20 kV,测量了该接地方案下放大器腔体的感应电压。结果如图7所示,放大器腔体相对于干净地网的触发感应电压峰值为1.7 kV。

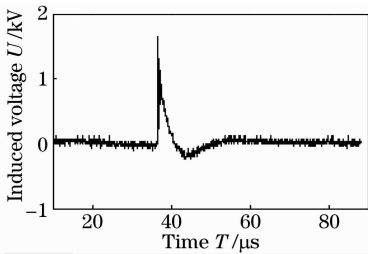


图7 放大器内外腔电一体化并接地时的感应电压

Fig. 7 Induced voltage of the cavity with the interior and the external cavities conducted and grounded together

与国际上普遍采用的内外腔分别接地的方案相比,该接地方案不仅同样能够大幅降低放大器腔体的感应电压,同时还消除了放大器内外腔之间的瞬间压差,从根本上消除了放大器内部电击穿的可能性。放大器内腔和外腔之间无需加入绝缘材料支撑,在降低放大器设计加工复杂程度,增强紧凑性的同时,也可以有效改善放大器腔内的洁净度。

5 放大器内外腔电一体化接地方案在神光Ⅱ第9路 $\phi 350$ mm片状放大器中的在线应用

在离线验证了放大器内外腔电一体化并整体接

地方案可行性的基础上,将该接地方案成功应用到了神光Ⅱ第9路 $\phi 350$ mm片状放大器中。各部分的电连接关系如图8所示, $\phi 350$ mm放大器的内腔和外腔通过导体材料连接支撑,整个放大器的金属结构为一个等电位体。将放大器腔体通过一根粗铜导线连接到CG。

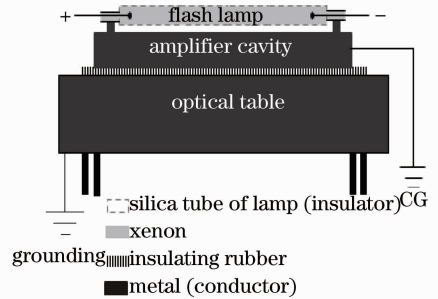


图8 第9路 $\phi 350$ mm放大器电连接关系示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the electrical connection relationship of the ninth beam $\phi 350$ mm disk amplifier

$\phi 350$ mm片状放大器工作充电电压为22 kV。图9为放大器接地前后氙灯放电瞬间腔体感应电压的变化情况。悬浮状态下腔体感应电压峰值为12.9 kV,接地以后,腔体感应电压峰值为2.3 kV,下降到悬浮状态下的18%。在采用该接地方案以来近一年的时间里, $\phi 350$ mm片状放大器已稳定可靠运行400多发次,从未发生过放大器内部以及放大器与平台之间的电击穿现象。

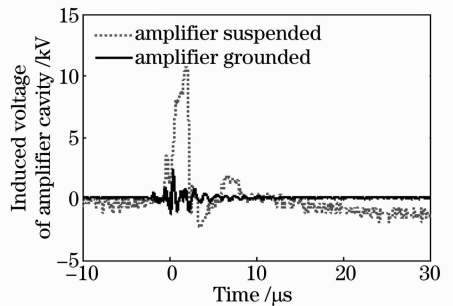


图9 放大器接地前后感应电压对比

Fig. 9 Contrast of the induced voltages when the amplifier is suspended and grounded

通过 $\phi 350$ mm片状放大器的在线应用实验,进一步证明了内外腔电一体化接地方案的可行性和优越性。在不影响放大器设计加工复杂程度和放大器腔结构紧凑性的前提下,从根本上消除了放大器内部电击穿的现象,同时大幅度降低了放大器腔体的感应电压,很好地解决了感应电压对片状放大器运行可靠性和安全性带来的不利影响。

6 结 论

实验研究了高功率片状放大器在悬浮状态下的感应特性,结果表明:高功率片状放大器氙灯放电过程属于高压高频的瞬态过程,放大器感应电压峰值可高达上万伏;感应电压的大小主要受到放大器的腔体结构、放大器充电电压以及氙灯数量的影响。实验研究了放大器在多种接地方式下的感应电压特性,提出了放大器内外腔电一体化并整体接地的接地方案,并对该方案进行了离线实验验证并成功应用到了神光Ⅱ第9路 $\phi 350$ mm片状放大器中。从根本上消除了放大器内部电击穿的可能性,并将放大器的感应电压降低到悬浮状态下的18%,很好地解决了感应电压对片状放大器运行可靠性和安全性带来的不利影响,同时有助于改善放大器的紧凑性和洁净度。采用电一体化并整体接地的方案以来, $\phi 350$ mm放大器稳定可靠运行400多发次,从未出现电击穿现象,进一步证明了该接地方案的可行性和优越性。

参 考 文 献

- Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics for ignition and gain [J]. *Phys Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- Kim Y, Mack J M, Herrmann H W, *et al.*. D-T gamma-to-neutron branching ratio determined from inertial confinement fusion plasmas[J]. *Phy Plasmas*, 2012, 19(5): 056313.
- He Xiantu. Progress and prospect of inertial confinement fusion research[J]. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 2000, 20(3): 248-251.
贺贤土. 惯性约束聚变研究进展和展望[J]. *核科学与工程*, 2000, 20(3): 248-251.
- Fan Dianyuan, He Xiantu. Inertial confinement fusion energy and the laser driver[J]. *Exploration of Nature*, 1999, 18(67): 31-35.
范滇元, 贺贤土. 惯性约束聚变能源与激光驱动器[J]. *大自然探索*, 1999, 18(67): 31-35.
- Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.*. National Ignition Facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- Ebrardt J, Chaput J M. LMJ project status[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2008, 112(3): 032005.
- Zhu Jianqiang. Shengguang-Ⅱ: high power 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.
- Tang Lijia, Cai Xijie, Lin Zunqi. Control of pulse shape in "SHENG GUANG Ⅱ" main amplifiers [J]. *Chinese Physica Sinica*, 2001, 50(6): 1075-1079.
唐立家, 蔡希洁, 林尊琪. "神光Ⅱ"主放大器中的波形控制[J]. *物理学报*, 2001, 50(6): 1075-1079.
- Zheng Yuxia, Zhu Jian, Qian Liejia, *et al.*. Investigation of

- "SHENG GUANG Ⅱ" main amplifier [J]. *Chinese J Lasers*, 1996, A23(4): 289-294.
- 郑玉霞, 朱 俭, 钱列加, 等. "神光-Ⅱ"主放大器的研制[J]. *中国激光*, 1996, A23(4): 289-294.
- Majumdar K C, Annese C E, MacIntyre A T, *et al.*. Systems reliability analysis for the national ignition facility [J]. UCRL-JC-122826, 1996.
- Sun Quan, Zhou Jinglun, Wei Xiaofeng, *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.
- Li Ping, Liang Yue, Xu Bing, *et al.*. Study on gain stability of main amplifier in high power laser facility [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0102007.
李 平, 梁 越, 徐 冰, 等. 高功率激光装置主放大器的增益稳定性研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0102007.
- Erlandson A C, Lambert, H Zapata L E, *et al.*. Effect of amplifier component maintenance on laser system availability and reliability for the US National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 1997, 3047: 138-147.
- Guo Liangfu, Zhou Pizhang, Li Yizheng, *et al.*. Research of dealing EMI modes for 4×2 multi-segment amplifier power system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(11): 1413-1416.
郭良福, 周丕璋, 力一峥, 等. 4×2 片状放大器能源系统防电磁干扰研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(11): 1413-1416.
- Peng Hansheng, Zhang Xiaomin, Fan Dianyuan, *et al.*. Status of high-power solid-state lasers and engineering science [J]. *Engineering Science*, 2001, 3(3): 1-8.
彭翰生, 张小民, 范滇元, 等. 高功率固体激光装置的发展与工程科学问题[J]. *中国工程科学*, 2001, 3(3): 1-8.
- Powell H T, Erlandson A C, Jancaitis K S, *et al.*. Flashlamp pumping of Nd: Glass disk amplifiers [C]. *SPIE*, 1990, 1277: 103-120.
- OMEGA UPGRADE OPERATIONS MANUAL, Volume I-System Description. Chapter 4: Power Conditioning [OL]. <http://www.lla.rochester.edu/omega-facility/omega/power.conditioning.php>.
- Stowers I F, Horvath J A, Menapace J A, *et al.*. Achieving and maintaining cleanliness in NIF amplifiers [C]. *SPIE*, 1999, 3492: 609-620.
- Honig J. Cleanliness improvements of National Ignition Facility amplifiers as compared to previous large-scale lasers [J]. *Opt Eng*, 2004, 43(12): 2904-2911.
- Cheng Xiaofeng, Wang Hongbin, Miao Xinxiang, *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.
- Erlandson A C, Marshall C, Rotter M, *et al.*. Design and performance of flash lamp-pumped Nd:glass amplifier for the NIF [J]. *ICF Quarterly Report*, 1998, 8(4): 162-170.
- Erlandson A C, Rotter M D, Frank D N, *et al.*. Design and performance of the beamlet amplifiers [J]. *ICF Quarterly Report*, 1995, 5(1): 18-28.

栏目编辑:张 腾