

·特邀综述·

## 神光 II 激光装置研制

朱健强<sup>1,2,\*</sup>, 陈绍和<sup>1,2</sup>, 郑玉霞<sup>1,2</sup>, 黄关龙<sup>1,2</sup>, 刘仁红<sup>1,2</sup>, 唐贤忠<sup>1,3</sup>, 张明科<sup>1,2</sup>,

徐振华<sup>1,2</sup>, 沈丽青<sup>1,2</sup>, 陈庆浩<sup>1,2</sup>, 彭增云<sup>1,2</sup>, 朱宝强<sup>1,2</sup>, 竺庆春<sup>1,2</sup>, 唐永兴<sup>1,2</sup>,

张伟清<sup>1,2</sup>, 唐福林<sup>1,2</sup>, 刘凤翹<sup>1,3</sup>, 毛楚生<sup>1,3</sup>, 朱俭<sup>1,3</sup>, 马伟新<sup>1,2</sup>, 李学春<sup>1,2</sup>, 杨琳<sup>1,2</sup>,

王树森<sup>1,2</sup>, 杨义<sup>1,2</sup>, 蔡希洁<sup>1,2</sup>, 林尊琪<sup>1,2</sup>, 范滇元<sup>1,2</sup>, 王世绩<sup>1,3</sup>, 顾援<sup>1,3</sup>, 邓锡铭<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;

<sup>3</sup>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** 神光 II 大型固体高功率激光装置是我国激光驱动器发展历史的里程碑, 其成功研制使我国高功率固体激光工程与技术、聚变物理与基础物理研究实现了全面且本质的跨越式发展。简要概述了神光 II 激光装置研制中创新发展的大量工程方案与技术手段, 举例介绍了神光 II 激光装置在近 20 年来的高质量运行中取得的众多有国际影响力的研究成果。经多方支持和多年持续发展, 已经形成数万焦耳级纳秒激光装置、皮秒拍瓦以及飞秒拍瓦激光装置等, 这些装置是我国惯性约束核聚变、强场物理、高能量密度物理等研究领域中的重要物理实验核心平台之一。

**关键词** 激光技术; 惯性约束核聚变; 固体激光驱动器; 聚变点火; 高功率激光

中图分类号 O437.3; TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0100002

## Review on Development of Shenguang- II Laser Facility

Zhu Jianqiang<sup>1,2,\*</sup>, Chen Shaohe<sup>1,2</sup>, Zheng Yuxia<sup>1,2</sup>, Huang Guanlong<sup>1,2</sup>, Liu Renhong<sup>1,2</sup>,

Tang Xianzhong<sup>1,3</sup>, Zhang Mingke<sup>1,2</sup>, Xu Zhenhua<sup>1,2</sup>, Shen Liqing<sup>1,2</sup>, Chen Qinghao<sup>1,2</sup>,

Peng Zengyun<sup>1,2</sup>, Zhu Baoqiang<sup>1,2</sup>, Zhu Qingchun<sup>1,2</sup>, Tang Yongxing<sup>1,2</sup>, Zhang Weiqing<sup>1,2</sup>,

Tang Fulin<sup>1,2</sup>, Liu Fengqiao<sup>1,3</sup>, Mao Chusheng<sup>1,3</sup>, Zhu Jian<sup>1,3</sup>, Ma Weixin<sup>1,2</sup>,

Li Xuechun<sup>1,2</sup>, Yang Lin<sup>1,2</sup>, Wang Shusen<sup>1,2</sup>, Yang Yi<sup>1,2</sup>, Cai Xijie<sup>1,2</sup>,

Lin Zunqi<sup>1,2</sup>, Fan Dianyuan<sup>1,2</sup>, Wang Shiji<sup>1,3</sup>, Gu Yuan<sup>1,3</sup>, Deng Ximing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup>Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

**Abstract** As a large-scale high-power and sophisticated laser facility, Shenguang-II (SG-II) is a milestone in the history of laser driver development in China. SG-II laser facility has evoked comprehensive and essential leap-style improvements in laser engineering, laser technologies, fusion researches and fundamental physics researches. We provide brief introductions on the great innovative developments of engineering solutions and technologies during the project implementation, and we also list some of the numerous researches of international influence, which have been achieved based on the high-quality operation of SG-II laser facility in the past 20 years. With the continuous

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2018-12-10; 录用日期: 2018-12-20

基金项目: 中国科学院对外合作重点项目(181231KYSB20160020)

\* E-mail: jqzhu@siom.ac.cn

great progresses of last decade and thanks to the support from leadership departments, facilities with delivery capacity of  $10^4$  J-level in nanoseconds,  $10^3$  J-level and petawatt-level in picoseconds, as well as  $10^2$  J-level and multi-petawatt-level in femtoseconds have been established, and will surely continue to operate as one of the key platforms on the researches of inertial confined fusion, strong field physics and high energy intensity physics in China.

**Key words** laser technique; inertial confinement fusion; solid-state laser driver; fusion ignition; high power laser

**OCIS codes** 140.3460; 140.3550; 140.3538

## 1 引 言

高功率固体激光驱动器发展与激光惯性约束核聚变(ICF)研究是自20世纪70年代以来,激光领域能够体现国家重大需求的重要热点研究,世界范围内的科技强国均开展实施了相关研究计划<sup>[1-2]</sup>。神光II装置于1989年开始论证,1994年启动,在工程实施中经历了两个阶段,即主体装置工程与精密化工程。1998年精密化项目在神光II工程逐步达标的基础上同步开展,于2004年通过验收,指标水平与当时国际运行中的最先进的装置基本等同。神光II装置研制过程中,实现了众多核心单元技术及元器件从无到有的跨越,形成的总体设计思想、总体创新集成等方面的突破,开启了我国高功率固体激光工程技术的新纪元,为我国下一代驱动器研制提供了坚实的基础,使我国成为在全世界范围内极少数具备驱动器全系统独立研发能力的国家。经过最近10年的不断发展,高功率激光物理联合实验室形成了以神光II装置为核心的激光物理综合平台,并不断拓展与加强该平台的功能,增加了神光II升级装置、多功能高能激光系统、高能皮秒拍瓦激光系统

以及超强飞秒5 PW激光系统等,具备了更完善的物理实验条件<sup>[3-5]</sup>。神光II装置是国内首个集物理理论、诊断、制靶、物理实验和驱动器五位一体的综合性ICF研究平台,也是我国在其后相当长的一段时间内进行聚变研究的核心平台之一,其基本物理目标是推动我国ICF研究;其近中期目标是在腔靶物理、内爆动力学、辐射输运、状态方程和X射线激光等方面做出前沿探索,满足基础研究与国防安全建设需求;其远期目标是实现清洁聚变能源这一满足人类未来能源需求的终极目标做出贡献<sup>[2]</sup>。

## 2 神光II装置方案设计

服务于装置建设与物理需求,神光II装置在光束列阵式构型、多程主放大构型、终端双靶室构型三个方面体现出前所未有的概念性创新,新一代国家ICF驱动器均沿袭了上述工程技术方案。在当时国内历史条件下,神光II装置研制难度体现在28项严格的技术指标上,分解到各单元器件的参数要求,几乎达到了当时器件的理论极限,部分指标如表1所示<sup>[6]</sup>。精密化项目则集中在提升最重要的8束激光功率平衡、激光靶面落点精度与脉冲整形能力三方面<sup>[7]</sup>。

表1 神光II装置部分设计指标

Table 1 Partial design specifications of SG-II laser facility

Parameter	Diameter/Beam	Energy/Duration	Waveform	Irradiance uniformity
Design specification	8 beams, 2 combined 2×2 array; $\phi$ 200 mm for master amplifier; $\phi$ 240 mm for FOA	$1\omega_0$ , 1 ns, 6 kJ; 100 ps/800 J; 20 ps/ 160 J; $3\omega_0$ , $\eta > 50\%$	Leading edge <300 ps; quasi-square for 750 J per beam	$\pm 10\%$ (F/3) for $\phi$ 500 $\mu$ m target surface
Parameter	Energy fluctuation	Contrast	Angular drift	Divergence for 70% energy
Design specification	$\pm 15\%$ for $1\omega_0$	$10^6$ for $1\omega_0$	$\leq 5''$ RMS	$\leq 0.05$ mrad
Parameter	Pointing accuracy	Target chambers	Positional accuracy	Duration fluctuation
Design specification	$\pm 10 \mu$ m at target	For ICF and XRL	$\pm 8 \mu$ m for target	$\pm 15\%$
Parameter	$3\omega_0$ requirement for experiment	Line focusing	Operation capacity	Success rate for target shooting
Design specification	1 ns, $3\omega_0$ , $45^\circ$ injected into ping hole of 380 $\mu$ m, total energy $\geq 2000$ J	Focal line width $\leq 80 \mu$ m; uniformity $\pm 10\%$ , focal line length 10-30 mm	300 shots per year	50% for initial; 70% for future; 90% for special experiment

$\omega_0$ : fundamental frequency;  $\eta$ : conversion efficiency; FOA: final optics assembly; XRL: X-ray laser; RMS: root-mean-square

神光 II 装置上述指标可归纳为 6 项驱动器重大能力需求:基频光输出能力需求、可聚焦功率密度能力和穿孔能力需求、三倍频输出能力需求、总体高稳定性工作及激光脉冲波形整形能力需求、8 路激光全系统自动准直能力需求以及激光束打靶高定点精度能力需求。为此,神光 II 装置研制在总体技术、单元技术以及元器件等方面实现了众多创新,主要包括:在装置前端及预放大阶段,发展了损耗调制型单纵模激光振荡器技术、全光纤集成波导前端、时空域调控技术以及功率平衡技术等;在主放大器中,发展了组合式同轴双程放大器技术、饱和增益角变反射率镜(AVM)调控技术、N31 号新型钽玻璃及包边技

术、自准直技术以及大口径能量计等;在终端光学系统中,发展实施了双靶场构型、大口径磷酸二氢钾(KDP)晶体生长与加工技术、高阈值化学防潮减反膜、三倍频功率平衡技术、凸柱面透镜列阵线聚焦技术以及高精度靶定位技术等。

### 2.1 神光 II 工程总体与主要分系统

神光 II 研制中,首创提出了组合式同轴双程片状主放大器构型,并将其与经典主振荡功率放大器(MOPA)相结合,构成了装置的总体设计思想。神光 II 装置总体系统由前端分系统、预放大器分系统、主放大器分系统、终端光学分系统等组成,主激光链路总体结构如图 1 所示,装置实景如图 2 所示。

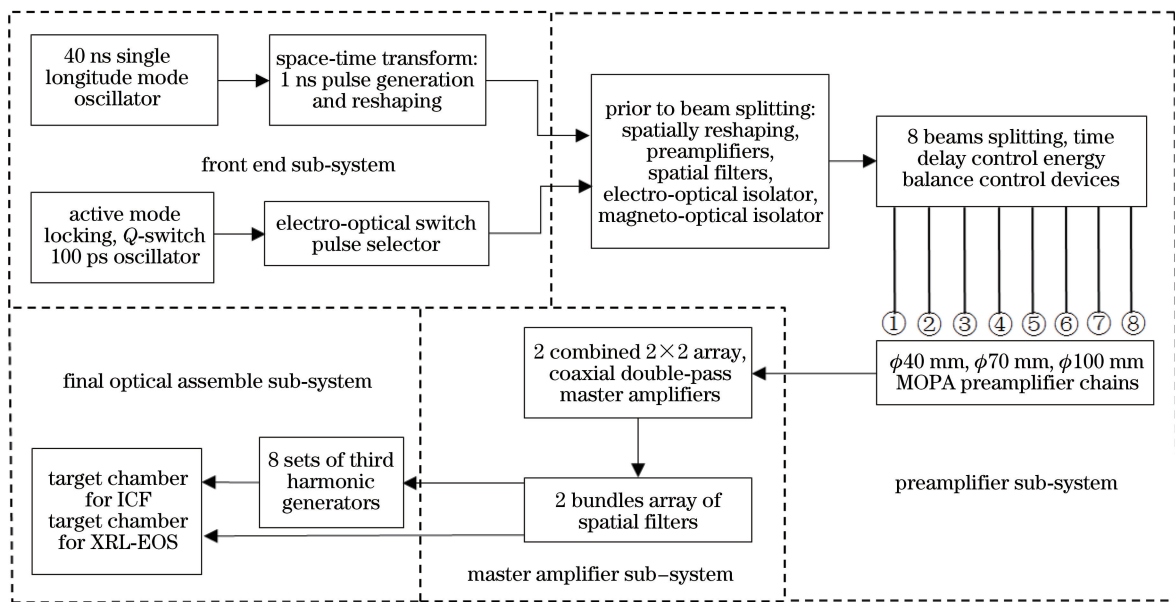


图 1 神光 II 装置总体结构框图

Fig. 1 Layout of SG-II laser facility



图 2 神光 II 装置大厅实景

Fig. 2 View of SG-II laser facility

#### 2.1.1 前端与预放大器分系统

前端激光分系统的主要功能是提供可整形的 1 ns 的较长脉冲与另一种 0.1 ns 的较短脉冲,作为工程总体两种脉冲工作模式的种子源,并实现多路激光高精度同步控制。该分系统发展了损耗调

制型单纵模激光器,输出种子脉冲模式稳定且波形平滑,将冷阴极闸流管用于时空偏转驱动源,在国际上首次发展了新型时空变换脉冲整形技术,并率先应用于大型激光系统。在精密化工程中,发展了由单纵模光纤激光器、预脉冲削波、光纤放大器、集成波导振幅调制器等 8 个技术单元构成的全光纤集成波导前端。该前端在脉冲整形能力方面,输出波形稳定、整形波形多样可控、整形脉冲包络光滑,如图 3(a)所示;在脉冲前沿控制方面,利用条纹相机测得的脉冲前沿上升时间为 97 ps;在光谱调制展宽方面,在国内首次实现了无时间畸变光谱展宽技术;在整形脉冲稳定性方面,幅度优于 2% RMS,如图 3(b)所示。全光纤集成波导前端实现了我国 ICF 激光驱动器前端分系统技术的全面突破。

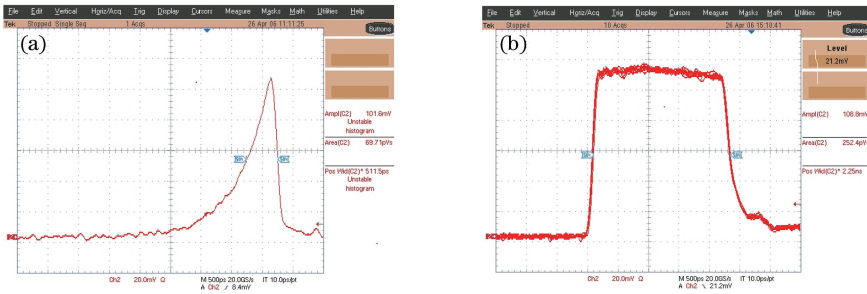


图 3 (a)前端高对比度预整形脉冲;(b)放大输出方波的 11 次叠加结果

Fig. 3 (a) High-contrast pre-shaping pulse from front end; (b) overlay square waves of 11 measurements for amplified pulses

预放大器分系统的主要功能是提供整个放大链路的大部分增益,实现信号脉冲能量  $10^8$  倍的放大,采用的是经典的 MOPA 结构。该分系统研制了基于高破坏阈值介质反射膜的超高斯锯齿软边光阑,其结构与工作原理如图 4 所示;国内首次成功研制

高精度衰减器能量平衡控制系统,达到能量平衡优于 1% 的国际先进水平;自主研制多路高精度延时同步触发器,结合能源系统的放大器充电电压精密控制,解决了 8 路各级放大器间增益分配问题,经过三次平衡调节,实现 8 路归一化输出能量,如图 5 所示。

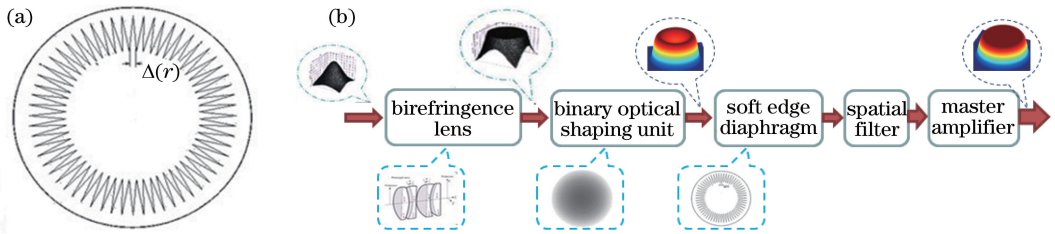


图 4 (a)锯齿软边光阑;(b)激光传输工作原理图

Fig. 4 (a) Toothed soft-edge diaphragm; (b) operating principle of laser transmission

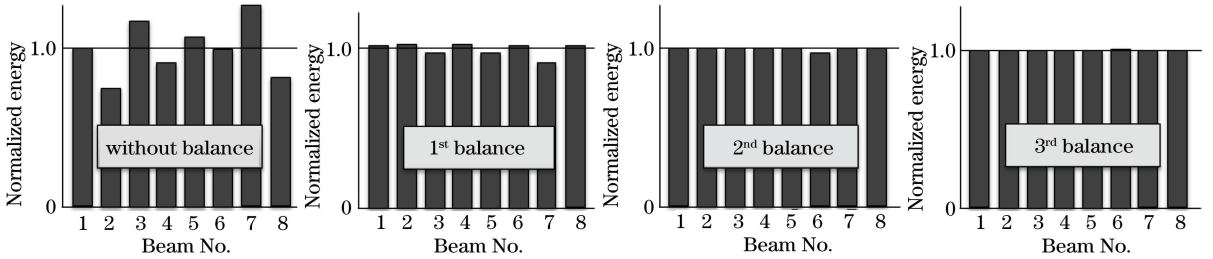


图 5 三次平衡后 8 路能量直方图

Fig. 5 Pulse energy histograms from eight beams after three-time balance

### 2.1.2 主激光放大器分系统

主激光放大器分系统的主要功能是实现  $8 \sim 10$  倍能量增益,提供全放大链路 80% 的激光能量。该分系统的主要特色包括:“四束合一”的新型列阵式光路构型、国内首次采用的多程放大构型、8 路主放大器输出能量与波形平衡。

新型列阵式光路构型如图 6 所示。该构型将 8 路激光等分为 2 个集成束组,每个束组包含一套  $2 \times 2$  列阵式同轴双程放大器和一套  $2 \times 2$  列阵式空间滤波器,每个空间滤波器的长度为 25 m、口径为 0.8 m。该类构型为神光 II 升级装置以及神光 III 装

置等激光驱动器所普遍采用。



图 6 新型激光传输列阵式空间滤波器结构图

Fig. 6 Bundles array of spatial filters for laser transmission

神光 II 装置组合式无开关同轴双程放大器结构如图 7(a) 所示, 该方案的主要特色包括: 激光传输突破了国际通用的一般性设计原则, 最大程度地利用主放大器通光口径, 使全激光光束的有效利用因子提高了 20%, 大幅度提高了激光输出能力; 将常规运行的 B 积分增量控制在 1.8 左右。同轴双程放大器系统的成功, 使该方案首次与三程、四程放大并

列, 成为国际上成功用于驱动器的典型案例。当时研制成功的同轴双程片状放大器如图 7(b) 所示。中国科学院上海光学精密机械研究所在国内首次自主成功研制了大口径高强度角变反射率膜与大口径 AVM, 并将其用于主放大器, 获得的 8 路激光功率平衡波形以及输出能量分别如图 8(a)、(b) 所示, 这为三倍频功率平衡提供了基础。

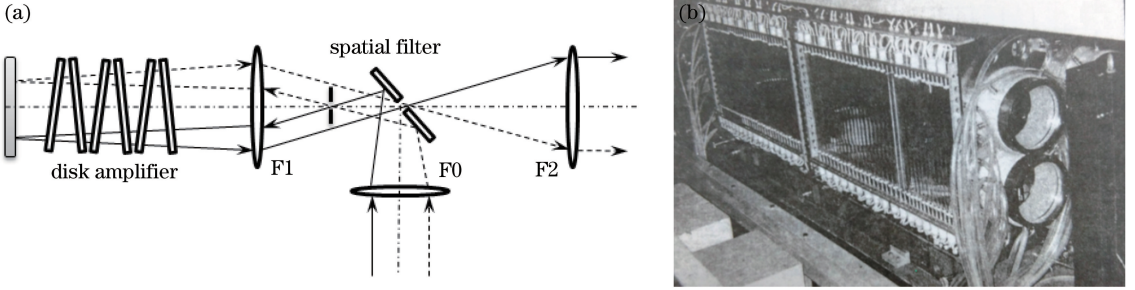


图 7 同轴双程放大器(a)工作原理图和(b)实物图

Fig. 7 (a) Operating principle diagram and (b) physical view of coaxial double-pass amplifier

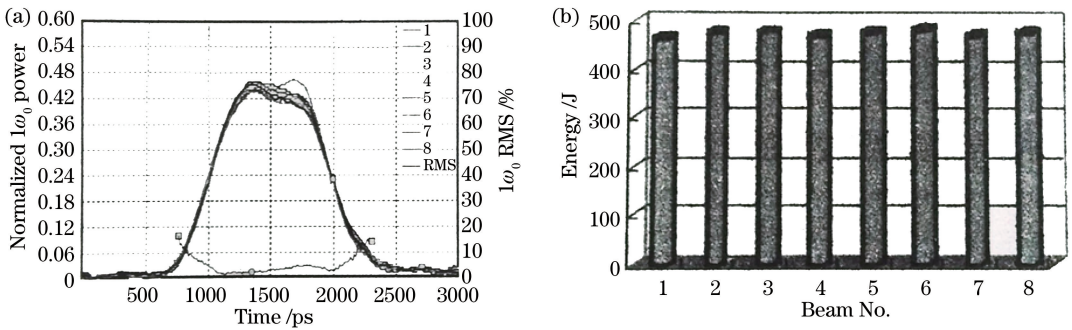


图 8 用 AVM 功率平衡调试后 8 路基频输出脉冲的(a)波形图和(b)能量图

Fig. 8 (a) Waveforms and (b) energy histogram of  $1\omega_0$  pulses from eight beams of SG-II after power rebalance with AVM

在装置放大器研制需求牵引下, 研制的新型 N31 磷酸盐钕玻璃激光工作物质性能优良, 并解决了软包边的氙灯辐照脱落问题, 使我国成为极少数具备大口

径钕玻璃生产能力的国家, 如图 9(a) 所示; 成功研制了国内口径最大( $\phi 300$  mm)的体吸收激光能量计, 能通量密度达到  $6 \text{ J/cm}^2$ , 如图 9(b) 所示。

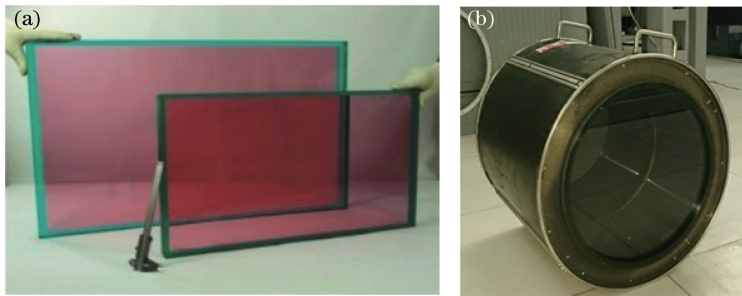


图 9 (a) 大口径钕玻璃工作物质; (b) 大口径体吸收激光能量计

Fig. 9 (a) Large aperture Nd:glass; (b) large aperture bulk absorption calorimeter

### 2.1.3 终端光学分系统

终端光学分系统包含靶场系统、频率转换系统和传输聚焦组件三个主要的功能单元, 适应于

激光驱动器功能拓展, 神光 II 装置在国内首次设计并采用的双靶室构型如图 10 所示, 包括 ICF 靶室与 XRL 靶室, 为其后研制的驱动器终端靶场所

普遍采用。ICF 靶室为直径为 1600 mm 的不锈钢球体,包括靶架安装孔、诊断孔、观察孔、安装孔等共计 125 个窗口。XRL 靶室为内径为 1200 mm、长度为 2770 mm 的圆柱形结构,是一个多功能型

靶室,光束经过不同光学系统后可形成的线聚焦可用于 XRL 及其应用,也可以形成较大辐照面积的靶面均匀照明,以开展高压状态方程等物理研究。

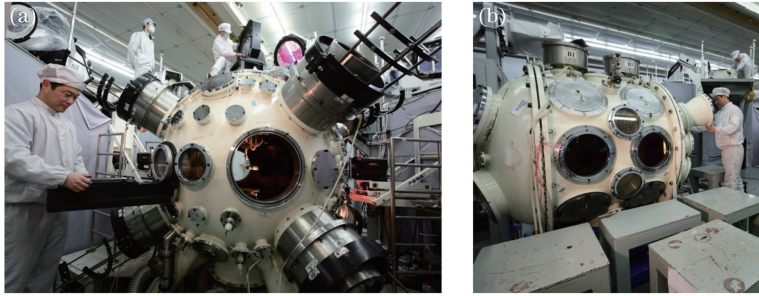


图 10 (a) ICF 靶室;(b) XRL 靶室

Fig. 10 (a) Target chamber for ICF; (b) target chamber for XRL

高转换效率、高负载能力、高稳定且束间功率平衡的频率变换系统是三倍频驱动器的核心单元之一。神光 II 的频率变换系统选择基于大口径 KDP 晶体的“II+II”类倍频与三倍频方式,实现三倍频激光外转换效率 $\geq 60\%$ ;通过调节频率变换系统倍

频晶体相位匹配角、三倍频晶体相位匹配角与偏振匹配角三个主要参数,实现的三倍频能量不平衡度达到 1.2% RMS,峰值功率不平衡度为 2.1% RMS,前沿功率不平衡度为 10%~13.2% RMS,如图 11 所示。

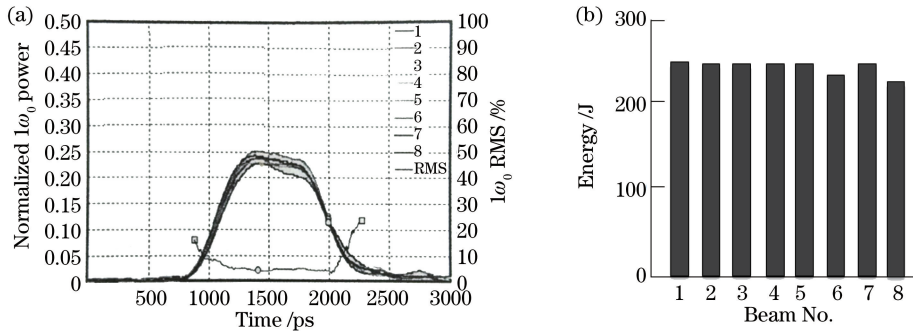


图 11 终端功率平衡后 8 束三倍频脉冲(a)波形和(b)能量直方图

Fig. 11 (a) Waveforms and (b) energy histogram of  $3\omega_0$  pulses from eight beams after power rebalance

终端光学分系统中的大口径光学元件,包括窗口镜、靶镜、防溅射板等玻璃元件以及 KDP、磷酸二氢钾等晶体元件。在神光 II 研制期间,高功率激光物理联合实验室自主开发了溶胶凝胶化学涂膜全套技术与工艺,在国内首次成功应用于终端光学元件,填补了国内强激光膜层领域的空白。在三倍频研制需求的牵引下,国内发展了大口径高质量 KDP 晶体生长及表面抛光技术,突破了美国的禁运,使当时成功用于神光 II 装置的晶体口径达到  $\phi 270$  mm。

神光 II 装置是国内首个实现全光路自动准直调整的驱动器,自准直系统采用“选好基准,以动制动”的技术路线,发展了有特色的动态阈值调整、强区中心跟踪、小步迭代跟踪、黑区中心跟踪等多种实用操作系统,使我国高功率激光装置调试技术发生了彻底变化,将神光 II 装置全 8 束激光调试时间缩短至

30 min 以内,并保证全系统瞄准精度。

## 2.2 神光 II 装置研制水平

2004 年完成神光 II 装置精密化工程,在此之前国际上只有 NOVA 装置和 OMEGA 装置具备精密化的三倍频运行能力。在光束质量方面,实现基频光聚焦 70% 能量( $3.5D_L$ ,  $D_L$  代表衍射极限),三倍频聚焦 95% 能量( $8D_L$ ),优于 OMEGA 装置三倍频聚焦 95% 能量( $9D_L$ )指标;在单路最高基频输出能力方面,神光 II 装置单路输出能量为 882 J,在相同通光面积条件下,与 OMEGA 装置的 1000 J 单路输出能量处于同一水平;在近场填充因子(FF)方面,神光 II 装置的 FF 达到 50%~60%,与当时日本 Gekko-X II 装置相当,较 OMEGA 装置略有差距;在三倍频运行方面,神光 II 装置的转换效率为 60% (最高为 67%),超过当时 Gekko-X II 装置的 30%~

50%，与 OMEGA 装置水平相当；神光 II 三倍频平均功率密度为 0.66 GW/cm<sup>2</sup>，最大为 1 GW/cm<sup>2</sup>，均为当时 OMEGA 装置的 1.28 倍。精密化神光 II 装

置与精密 OMEGA 装置的性能对比如表 2 所示。精密化神光 II 装置是当时国际上能够提供常规运行能力的两台精密化三倍频驱动器之一。

表 2 精密化神光 II 装置与精密 OMEGA 装置性能对比

Table 2 Performance comparison between precision SG-II and precision OMEGA laser facilities

Parameter	Power		Laser shooting accuracy			Front end specification		
	Power	unbalance	Target	Pointing	Angular	Stability	Reshaping	Front edge
			mirror	position	deviation		duration	
Precision SG-II	5% RMS		F/3.3	14.1 μm RMS	3.7" RMS	2% RMS	108 ps, 1-3 ns	94 ps
Precision OMEGA	5% RMS		F/6.2	30 μm RMS	3.5" RMS	2% RMS	1-5 ns	100 ps

### 3 神光 II 装置运行与成果

神光 II 装置建成以后，每年运行发射 1000 次以上，主要分配在聚变物理研究、高功率激光技术与器

件验证、国际合作开放实验研究三个方面。神光 II 装置在 2004 年之前已提供正式物理实验打靶 2025 发次，2004—2017 年累计提供物理实验打靶 8390 发次，平均成功率为 91.7%，如表 3 所示。

表 3 神光 II 装置历年物理实验发次统计

Table 3 Statistics shots of SG-II laser facility for physical experiments over year

Year	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2006	2005	2004
Total No.	868	503	545	530	525	562	540	492	425	254	351	430	340
Success No.	839	486	527	512	503	513	495	439	396	230	270	372	256
Ratio /%	96.7	96.6	96.7	95.8	95.8	91.3	91.7	89.2	93.2	90.2	77.0	86.5	75.3

在聚变相关物理应用研究方面，神光 II 装置历年累计用于聚变相关物理与应用研究的发次包括：2004 年之前的 2025 发次、表 3 统计数据中的 2008 年以前的 1121 发次，以及 2008 年之后的大部分发次。这些发次实验在腔靶物理、内爆动力学、辐射输运以及 X 射线激光等方面取得了大量有重要意义的成果。比如：2000 年，神光 II 装置首轮基频光 ICF 直接驱动中子实验中，获得单发最高  $4 \times 10^9$  中子产额，间接驱动所获得的辐射温度等实验结果，均达到了国际同类装置最好水平。同年，获得了增益饱和的类镍银 13.9 nm 的 X 射线探针激光，并观测到了待测等离子体临界面附近电子密度空间分布。2015—2016 年，神光 II 装置结合第 9 路皮秒拍瓦系统，开展国际首次间接驱动预压缩快点火集成实验，实现了超过 40 倍中子增益、较没有高能拍瓦激光注入时高 300 倍的国际最高水平，是我国在快点火实验研究的里程碑。

流偏折现象的实验研究获得成功，国内联合研究团队利用神光 II 装置，近距离、可控制、可重复地对 Herbig-Haro 110/270 系统中的喷流偏折现象进行了实验再现<sup>[10]</sup>。

神光 II 装置自 2008 年开放实验以来，国内外科研机构在激光聚变、高能密度物理、高温高密度等离子体物理、实验室天体物理等研究中取得一系列原创性世界一流成果。比如：2010 年，利用神光 II 装置(含第 9 路)在实验室中对太阳耀斑中的环顶 X 射线源和重联喷流进行了实验模拟<sup>[8]</sup>；2011 年，对超新星遗迹激发的无碰撞冲击波过程进行了实验室模拟<sup>[9]</sup>；2015 年，对 Herbig-Haro 天体中超音速喷

**致谢** 神光 II 装置是在中国科学院、中国工程物理研究院、原国家 863 计划两大主题、原国防科工委共同支持下成功完成的。自 1994 年装置研制正式启动以来，在中国科学院、中国工程物理研究院的殷切关怀下，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管理委员会领导下，学术委员会和监理组具体指导下，国家 863 计划技术方面的有力支持下，中国科学院上海光学精密机械研究所的支持下，高功率激光物理联合实验室科研人员共同奋斗，神光 II 装置于 2001 年完成验收，精密化项目于 2004 年完成验收，装置运行参数全面达到或超过合同规定的各项指标，在此向各领导单位致以诚挚的谢意。同时，也向邓锡铭、顾援、蔡希洁、林尊琪等为神光 II 装置研制做出突出贡献的逝去的前辈表示深切的怀念。

### 参 考 文 献

[1] Fan D Y, Zhang X M. Laser fusion and high power laser: history and progress [J]. Physics, 2010, 39 (9): 589-596.

- 范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展[J]. 物理, 2010, 39(9): 589-596.
- [2] Lin Z Q. 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.
- [3] Zhu J Q, Xie X L, Sun M Z, *et al.* Analysis and construction status of SG-II 5 PW laser facility[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e29.
- [4] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, *et al.* Status and development of high-power laser facilities at the NLHPLP[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e55.
- [5] Zhu J Q, Sun M Z, Xu G, *et al.* Development of the ultrashort high power laser in the National Laboratory on High Power Laser and Physics [J]. The Review of Laser Engineering, 2018, 46(3): R1543.
- [6] Lin Z Q, Wang S J, Fan D Y, *et al.* Successful operation of 8 beam SG-II laser facility for both  $1\omega_0$  and  $3\omega_0$  output [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(3): 403-407.
- [7] Lin Z Q, Deng X M, Fan D Y, *et al.* SG-II laser elementary research and precision SG-II program[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 44(1-4): 61-66.
- [8] Zhong J Y, Li Y T, Wang X G, *et al.* Modelling loop-top X-ray source and reconnection outflows in solar flares with intense lasers [J]. Nature Physics, 2010, 6(12): 984-987.
- [9] Liu X, Li Y T, Zhang Y, *et al.* Collisionless shockwaves formed by counter-streaming laser-produced plasmas[J]. New Journal of Physics, 2011, 13(9): 093001.
- [10] Yuan D W, Wu J F, Li Y T, *et al.* Modeling supersonic-jet deflection in the Herbig-Haro 110-270 system with high-power lasers[J]. The Astrophysical Journal, 2015, 815(1): 46-52.