

# 神光 II 升级激光装置基频输出能力提升\*

谢静 王利 刘崇 张艳丽 刘强 汪涛 柴志豪  
夏志强 杨琳 张攀政<sup>†</sup> 朱宝强

(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)

(2023 年 4 月 20 日收到; 2023 年 8 月 18 日收到修改稿)

神光 II 升级装置是国际上为数不多常年运行的惯性约束核聚变激光装置, 为进一步提升其输出能力以满足更高物理需求, 采用新型钼玻璃, 并结合增加钼玻璃数、提高氙灯能源配置等措施来提升主放大器的增益能力. 改进后的测试表明装置的平均小信号增益系数从 4.15% cm 增至 4.94% cm, 单路小信号增益倍数从 9000 提升到 118000, 提升幅度超过了 1 个数量级, 有效降低了高通量下非线性相移引起的激光近场小尺寸调制, 提升了装置基频输出能力, 为实现更高的打靶能量奠定关键基础. 运行打靶验证了装置高峰值功率下基频近场调制的改善, 以及 10 ns 脉冲 12.5 kJ 的基频输出能力, 有力支撑了高通量要求的物理实验目标.

**关键词:** 高功率激光, 增益能力, 输出性能

**PACS:** 42.60.-v, 42.60.Lh, 42.60.Jf, 42.82.Bq

**DOI:** 10.7498/aps.72.20230643

## 1 引言

惯性约束核聚变对未来清洁能源发展具有重大意义, 是各科技强国争相开展部署的战略制高点, 研究的关键在于建立高能量高功率激光驱动器. 目前美国 NIF、法国 LMJ、中国神光系列装置是国际上聚变级激光驱动器发展主力<sup>[1-3]</sup>. 近年来物理实验逐渐个性化、复杂化, 不仅对装置控制精度和运行效率提出更高要求, 更对装置的安全输出能力提出进一步挑战.

高功率激光装置安全运行能力主要受到基频输出能力、三倍频效率、光学元件损伤 3 个方面的影响. 在装置的激光放大链中, 放大器的增益能力不仅直接影响基频的输出能力, 更通过激光脉冲传输放大过程能流分布的变化影响激光的非线性相移, 进而影响输出光束的近场质量和光学元件的损伤<sup>[4,5]</sup>. 根据其机理不同, 光学元件损伤主要分为功

率密度损伤和能量密度损伤, 两者都直接受到近场质量的影响. 激光束在光学介质中传输放大, 总会产生与光强相关的非线性相移. 由光学元件材料、加工缺陷、污染、损伤点等引起激光近场上的调制(包括相位型和振幅型)在非线性相移的作用下所产生的非线性放大或热像, 是激光近场产生强区进而引起元件损伤的主要原因之一<sup>[6,7]</sup>. 因此, 通过提升放大器小信号增益系数和增益倍数, 在提升输出能量的同时降低非线性相移、进而提升近场质量降低元件损伤是提升装置输出能力的有效手段.

中国的神光 II 升级装置于 2015 年建成并投入运行, 共 8 束纳秒激光, 单束基频最大输出能力为 8 kJ/5 ns 方波, 可支持三倍频到靶总能量 24 kJ/3 ns 方波物理实验打靶<sup>[8,9]</sup>. 随着物理实验的开展, 物理对装置不断提出更高的能量要求, 尤其是新型激光聚变点火研究, 提出了集高峰值功率、长脉宽、大能量、三角波形为一体的复杂打靶要求<sup>[10,11]</sup>. 近两年来, 升级装置通过采用新型钼玻

\* 中国科学院战略性先导科技专项 A 类 (批准号: XDA25010100) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: [nwpuzhangpanzheng@163.com](mailto:nwpuzhangpanzheng@163.com)

璃、增加钕玻璃数、提升氙灯储能配置等措施,实现主放大器系统小信号增益系数和总增益倍数分别从 4.15% cm 和 9000 倍向 4.94% cm 和 118000 倍的大幅提升,进而在提升装置基频输出能力的同时,降低了激光近场的小尺寸调制,为装置实现更高打靶能量和高峰值功率下的安全运行奠定关键基础,推动中国高能密度物理前沿和激光聚变研究快速发展<sup>[12–14]</sup>.

## 2 主放大器改进措施及其影响

### 2.1 放大增益理论分析

大型高功率激光装置超过 90% 的能量由主放大器系统提供. 神光 II 升级装置主放大系统采用 2 程助推+4 程腔放的结构. 如图 1 所示,从预放大单元输出的激光束注入到传输空间滤波器中被反射至包含 5 片钕玻璃的助推放大器进行第一次放大,在偏振片、大口径普克尔盒、腔镜和变形镜的协同作用下,4 次通过腔空间滤波器及包含 8 片(现增至 9 片)钕玻璃的腔放大器后,再次经过助推放大和传输空间滤波器,最终传输至靶场,即整个主放大过程包含 2 次助推放大和 4 次腔放大.

为方便计算脉冲激光在装置放大链中的能流分布,此处忽略激光近场的分布不均匀性,则脉冲激光的放大过程满足<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\partial A(z,t)}{\partial z} = [\mathrm{i}\gamma(z)|A(z,t)|^2 + g(t)] A(z,t), \quad (1)$$

其中  $A(z,t)$  为激光脉冲时间包络,  $\gamma(z)$  为激光介质非线性系数,  $g(t)$  为放大器增益系数:

$$g(t) = \frac{g_0}{1 + |A(z,t)|^2/I_{\text{sat}}}, \quad (2)$$

$$g_0 = \Delta n \cdot \sigma, \quad (3)$$

$$\Delta n = n_0 W \tau. \quad (4)$$

其中  $g_0$  为小信号增益系数,  $I_{\text{sat}}$  为饱和光强,  $\Delta n$  为上转换粒子数密度,与钕玻璃掺杂浓度  $n_0$ 、激发概率  $W$  和上能级寿命  $\tau$  正相关,  $\sigma$  为受激发射截面. 由此可见,采用具有更高掺杂浓度、更大发射截面和更长荧光寿命的钕玻璃增益介质,可有效提升放大器的增益能力.

激光与物质相互作用本质上是激光与介质极化电场之间的相互作用,强光影响下的自由电子的非谐振运动导致电偶极子的极化强度对于电场呈现出非线性,因而产生与光强相关的非线性相移. 脉冲激光在主放大链中的非线性相移可用  $B$  积分来表征<sup>[16]</sup>:

$$B = \frac{kn_2}{n} \int I(z) \mathrm{d}z. \quad (5)$$

其中  $k$  为入射激光的波矢量,  $n$  和  $n_2$  分别为介质的线性和非线性折射率,  $I$  为入射激光光强,  $z$  为传输距离. 此时考虑激光近场的调制变化,根据微扰理论,近场调制的强度变化表现出与  $B$  积分相关的非线性增长:

$$I \propto \exp(k\gamma IL) \propto \exp(kB). \quad (6)$$

当近场调制增长到一定程度,微扰理论不再适用,此时调制在连续激光介质中的变化形式满足包含自聚焦项的傍轴传输方程自恰解,峰值光强为  $I_0$  的高斯光束可表示为<sup>[17]</sup>

$$I(r,z) = \frac{I_0}{f^2(z)} \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega_0^2 f^2(z)}\right], \quad (7)$$

$$f^2(z) = 1 + \frac{z^2}{z_R^2} \left(1 - \frac{I_0}{I_c}\right), \quad (8)$$

$$z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}. \quad (9)$$

其中  $f(z)$  函数表征自聚焦丝成像,  $z_R$  表示光束的瑞利长度,  $\omega_0$  为束腰半径,当入射光强  $I_0$  大于临界光强  $I_c$  时,在经历足够长的激光介质后将出现

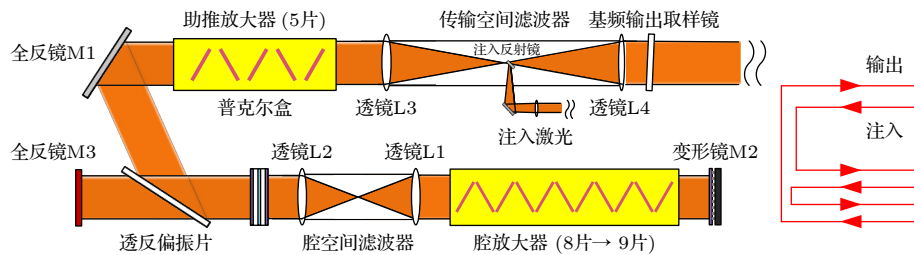


图 1 神光 II 升级装置主放大器结构

Fig. 1. Structure of the main amplifier of SGII-UP laser facility.

$f(z) = 0$ , 此时入射高斯光束将塌陷至细丝光束, 激光强度急剧上升至元件成丝破坏. 由此可见, 有效控制主放大链中激光脉冲的  $B$  积分, 是控制激光近场质量避免近场调制引起元件成丝损伤的有效手段.

## 2.2 钕玻璃配置改进

通过增加钕玻璃数来增加增益长度是提高主放大器储能最直接的方案, 在升级现有边界条件下, 钕玻璃数可以从 8 片增至 9 片, 但深度饱和条件下  $B$  积分也将随之剧增. 为了降低  $B$  积分、提升装置运行安全性, 一般要求采用非线性折射率小、增益系数大、长度短的工作物质. 从表 1 可以看出, 与装置建成时主放大器采用的 N31 型号磷酸盐钕玻璃相比, 新型 N41 钕玻璃具有更高的掺杂浓度、更大的受激发射截面和更低的非线性折射率系数, 在离线测试中显示了更优异的增益性能<sup>[18]</sup>.

表 1 N31 和 N41 钕玻璃参数对比  
Table 1. Characteristics comparison of N31 and N41 Nd: glass.

参数	N31	N41
$\text{Nd}^{3+}$ 掺杂浓度/ $(10^{20} \text{ cm}^{-1})$	3.5	4.2
受激发射截面/ $(10^{-20} \text{ cm}^{-3})$	3.8	3.9
荧光寿命/ $\mu\text{s}$	310	310
1053 nm 非线性折射率系数/ $(10^{-13} \text{ esu})$	1.20	1.05
1053 nm 折射率	1.532	1.504
密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	2.850	2.596

综上所述, 表 2 列出了最终放大器钕玻璃的配置方案, 助推放大器增益介质均采用新型 N41 钕玻璃, 腔放大器沿用装置原 N31 钕玻璃. 性能提升之前, 助推和腔放都采用 N31 钕玻璃, 其中助推采用 5 片 N3130 型号钕玻璃, 腔放采用 8 片 N3122 型号钕玻璃; 性能提升之后, 助推采用 5 片 N4142 型号钕玻璃, 腔放沿用原助推更换下来的钕玻璃, 并考虑从 8 片增至 9 片, 即最终由 4 片 N3122 和 5 片 N3130 构成.

表 2 主放大器改进前后助推放大器和腔放大器的钕玻璃构成

Table 2. Configuration of Nd: glass in the main amplifier.

	助推放大器的钕玻璃	腔放大器的钕玻璃
改进前	5片N3130	8片N3122
改进后	5片N4142	4片N3122 + 5片N3130

## 2.3 能源配置改进

为匹配主放大器钕玻璃配置提升后的能源储能供给, 增强了主放大器氙灯的放电回路配置. 氙灯为钕玻璃增益介质提供泵浦光, 其能源配置决定了钕玻璃泵浦光的功率. 氙灯工作时爆炸系数不应超过 0.3, 因此以爆炸系数维持 0.29 为前提增大泵浦储能. 每个放电回路 4 灯串, 将单回路的电容、电感、电压配置从 250  $\mu\text{F}$ /75  $\mu\text{H}$ /22 kV 改为 350  $\mu\text{F}$ /150  $\mu\text{H}$ /23.5 kV; 同时回路数从 186 增至 200; 并为保证能源提升后的运行可靠性和安全性, 将引燃管改为固体开关. 这些措施使氙灯能源系统总储能从 14.5 MJ 提升到 22.0 MJ.

按照扩容后的能源配置, 不同钕玻璃材料所对应的放大器增益系数模拟预测值见表 3. 采用 N4142 钕玻璃的助推放大器, 小信号增益系数为 5.24% cm; 采用 N3130 钕玻璃的腔放大器, 小信号增益系数为 4.90% cm; 采用 N3122 钕玻璃的腔放大器, 小信号增益系数为 4.70% cm; 综合下来改进后的主放大器钕玻璃的平均小信号增益系数为 4.90% cm.

表 3 改进后不同钕玻璃材料小信号增益系数模拟计算值

Table 3. Calculation value of small gain coefficient of different Nd: glass after improvement.

钕玻璃材料	厚度/mm	增益系数/ $\text{cm}^{-1}$
N4142	40	5.24%
N3130	45	4.90%
N3122	45	4.70%

## 3 输出能力分析

依据上述预测结果, 主放大系统性能提升后平均小信号增益系数将从 4.15% cm 提升到 4.94% cm. 为了探究装置潜在输出性能, 基于神光 II 升级装置的实际构型模拟了在装置性能提升前后输入输出情况.

如图 2 所示, 提升前受到主放大器储能限制, 当基频输出能量达到 8 kJ 左右时主放大器进入增益饱和状态, 要想进一步提升基频输出能量, 需要大幅度提升输入能量. 另一方面, 为了控制主放大系统注入反射镜损伤风险, 一般要求注入能量在 5 J 以内. 因此装置最大基频输出能量在 8 kJ 左右. 增益提升后, 主放大器增益饱和对应的基频输

出能量达到 12 kJ 以上, 且所需注入能量处于注入反射镜安全范围内. 只需 1.26 J 注入能量就可实现 10 kJ 的基频输出, 可见增益能力的提升将显著提高装置的安全运行能力.

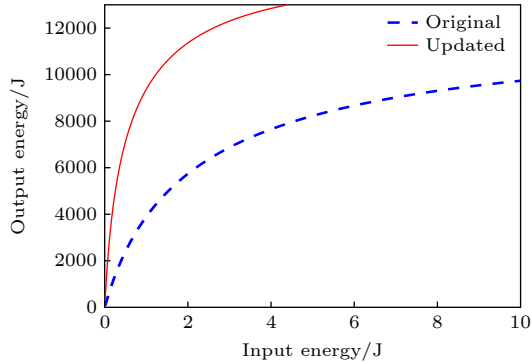


图 2 装置增益性能提升前后装置 10 ns 方波对应的输入输出能力对比

Fig. 2. Comparison of input and output capability curve before and after the improvement for 10 ns pulse.

$B$  积分表征激光在主放大链中的非线性相移. 更小的  $B$  积分代表装置更高的激光近场质量、聚焦焦斑质量和安全输出能力. 一般以累积  $B$  积分 ( $\Sigma B$ ) 不超过 3.5, 级间  $B$  积分 ( $\Delta B$ ) 不超过 1.8 作为高功率激光装置输出功率的重要约束条件之一. 提升前后, 在不同脉宽下 (10 ns, 5 ns), 累积  $B$  积分随着输出能量的变化曲线如图 3 所示 (为了方便对比, 此处忽略了提升前主放大系统增益饱和及元件损伤风险导致的基频最大输出能量在 8 kJ 左右的限制条件), 输出 10 kJ/10 ns/ $1\omega$  对应的累积  $B$  积分从 2.03 降为 1.51; 输出 10 kJ/5 ns/ $1\omega$  对应的累积  $B$  积分从 4.23 降为 3.07; 以累积  $B$  积分不超过 3.5 为约束条件对应的 5 ns 方波最大输出能量从 9.2 kJ 提升到 10 kJ 以上. 图 4 显示增益提升前后, 输出 3 kJ/1 ns/ $1\omega$  的累积  $B$  积分从 3.16 降为 2.77, 级间  $B$  积分从 1.66 降为 1.44, 意味着该功率密度下激光近场质量会有一定提升. 以级间  $B$  积分不超过 1.8 为约束条件对应的 1 ns 方波, 最大输出能量从 3.2 kJ 提升到 3.5 kJ.

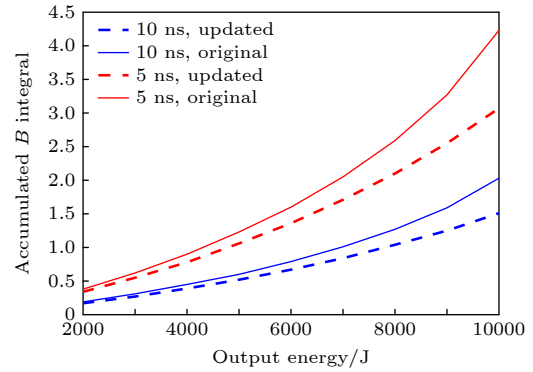


图 3 装置增益性能提升前后 5 ns 和 10 ns 方波下的输出能力与累积  $B$  积分的关系对比

Fig. 3. Comparison of input and accumulated  $B$  integral curve under 5 ns and 10 ns pulse before and after the improvement.

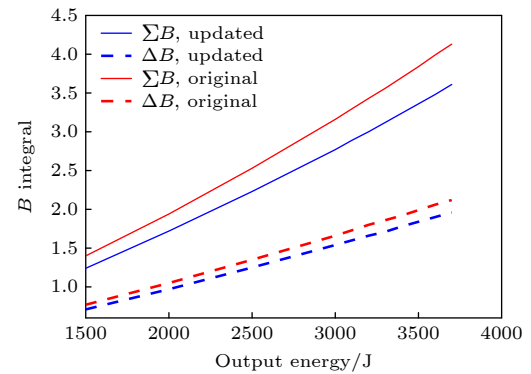


图 4 装置增益性能提升前后 1 ns 方波下的输出能力与累积  $B$  积分及级间  $B$  积分  $\Sigma B$  的关系对比

Fig. 4. Comparison of input and accumulated  $B$  integral curve under 1 ns flat pulse before and after the improvement.

综上, 改进后的装置提升了主放大系统储能, 降低了增益饱和效应, 从而降低了对注入能量的需求, 缓解光学元件的损伤压力. 同时能流的改变也减轻主放大器段  $B$  积分的累积, 从而提高了装置的激光近场质量、聚焦焦斑质量和安全输出能力上限. 计算表明, 升级装置经过上述措施的改进后, 依据储能限制、损伤限制和  $B$  积分限制, 不同脉宽下的安全边界见表 4, 可见最大输出能力将从 8 kJ/10 ns 提升到 12.5 kJ/10 ns. 图 5 则给出了装置实际运行输出的底宽为 3 ns 的典型斜角波案例.

表 4 不同脉宽下的装置基频输出能力评估

Table 4. Estimation of output capability at different frequencies.

配置	输出能力/kJ					
	10 ns 方波	10 ns 斜角波	5 ns 方波	5 ns 斜角波	3 ns 方波	3 ns 斜角波
改进前	8.0	8.0	8.0	6.5	7.4	4.47
改进后	12.5	12.5	11.2	7.3	8.2	4.8



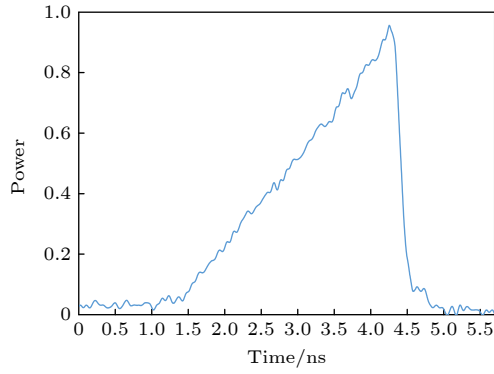


图 5 典型斜角波

Fig. 5. Typical oblique pulse.

## 4 增益性能测试和输出能力验证

### 4.1 小信号增益系数测试

为了量化改进前后对于增益能力的提升作用,选取升级第三路进行小信号增益系数测试. 结果在表 5 列出, 改进之前 3 发次的平均增益系数为 4.15% cm, 改进之后 2 发次测试的平均增益系数为 5.04% cm; 小信号增益倍数从 9100 提升到 138000, 超过了 1 个数量级. 改进后其他几路的测试数据见表 6, 综合装置各路平均小信号增益系数为 4.94%, 与理论计算值相符, 平均小信号增益倍数为 118000 倍.

### 4.2 近场质量分析

在高功率密度的打靶实验中, 放大器增益能力的提升使得相同输出能量下需要的注入能量更小, 激光在传输放大过程中的  $B$  积分更小, 即中高频

调制的非线性放大得到抑制, 从而改善主激光的近场质量, 增加了安全运行能力. 大型高功率激光装置的光束近场质量通常指强度分布的均匀性, 常用评价指标有近场平顶区域通量对比度和调制度<sup>[19,20]</sup>, 分别定义如下:

$$C = \frac{1}{I_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i (I_i - I_{\text{avg}})^2}, \quad (10)$$

$$M = I_{\text{max}} / I_{\text{avg}}, \quad (11)$$

其中  $C$  为近场对比度,  $I_i$  为区域内第  $i$  个像素对应的光强,  $N$  为像素总数,  $I_{\text{avg}}$  为局部区域的平均光强,  $M$  为近场调制度,  $I_{\text{max}}$  为区域最大光强.

为验证效果比较改进前后装置在高平均功率密度运行条件下的激光近场质量, 如图 6 所示, 对应发次编号分别为 20180123002 (平均能量 2763 J/1 ns/1  $\omega$  方波) 和 20201009003 (平均能量 2910 J/1 ns/1  $\omega$  方波). 由图 6 可见, 经过提升之后装置各路激光输出近场的对比度和调制度都有明显下降, 中高频调制明显降低, 说明激光在传输放大过程中的  $B$  积分更小, 也意味着装置具有更高的安全运行能力.

进一步对比第 5, 8 路两发次输出近场的功率密度分布, 如图 7 所示. 第 5 路改进前后两发次对应的平均功率密度分别为 3.28 和 3.18 GW/cm<sup>2</sup>, 差别只有 3%. 图 7(a) 与图 7(b) 相比可以看出, 改进后发次对应的直方图包络的后沿明显变快, 说明近场中高频调制的能量占比更小, 功率密度分布更向平均值集中. 表 7 表明, 功率密度大于 4 GW/cm<sup>2</sup>

表 5 升级第三路片放增益提升前后的实测数据

Table 5. Measurement value of output energy of SGII-UP Facility Beam 3 before and after improvement.

	发次编号	注入能量/mJ	输出能量/J	放大倍数	增益系数/cm <sup>-1</sup>
改进前	20181022008	198.25	628.88	8175	4.10%
	20190525001	189.38	652.30	8877	4.14%
	20190525002	192.30	750.00	10052	4.21%
改进后	20200826001	14.47	779.33	138810	5.04%
	20200826002	13.38	715.61	137844	5.04%

表 6 升级其他光路片放改进后的实测数据

Table 6. Output energy measurement value of other beams of SGII-UP Facility after improvement.

光束编号	注入能量/mJ	输出能量/J	放大倍数	增益系数/cm <sup>-1</sup>	光束编号	注入能量/mJ	输出能量/J	放大倍数	增益系数/cm <sup>-1</sup>
1	13.9	731.8	135111	5.00%	6	28.7	985.4	101343	4.88%
2	12.8	449.5	103428	4.89%	7	24.2	941.6	115029	4.94%
4	13.6	492.2	106537	4.91%	8	19.5	959.0	126692	4.98%

的像素点占比从 18.5% 降低到 16.5%，功率密度大于  $5 \text{ GW/cm}^2$  的像素点占比从 2.9% 降低到 0.8%，说明改进后激光近场的强调制点明显减少。第 8 路改进前后的两个发次对应的平均功率密度分别为

3.18 和  $3.81 \text{ GW/cm}^2$ ，改进后发次对应的直方图包络同样具有较快的后沿。如表 7 所示，改进后发次功率密度大于  $4 \text{ GW/cm}^2$  的像素点占比为 45%，这是由于该发次输出能量更高，具有更高的平均功

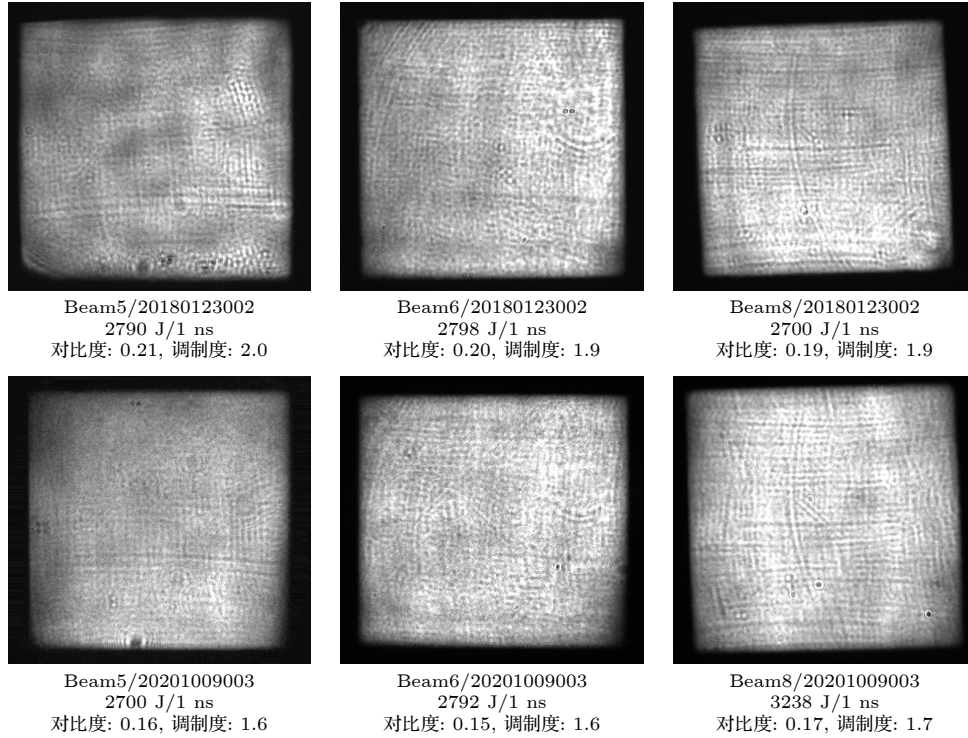


图 6 改进前后高平均功率密度条件下的激光近场对比

Fig. 6. Comparison of the near-field with high average power density before and after improvement.

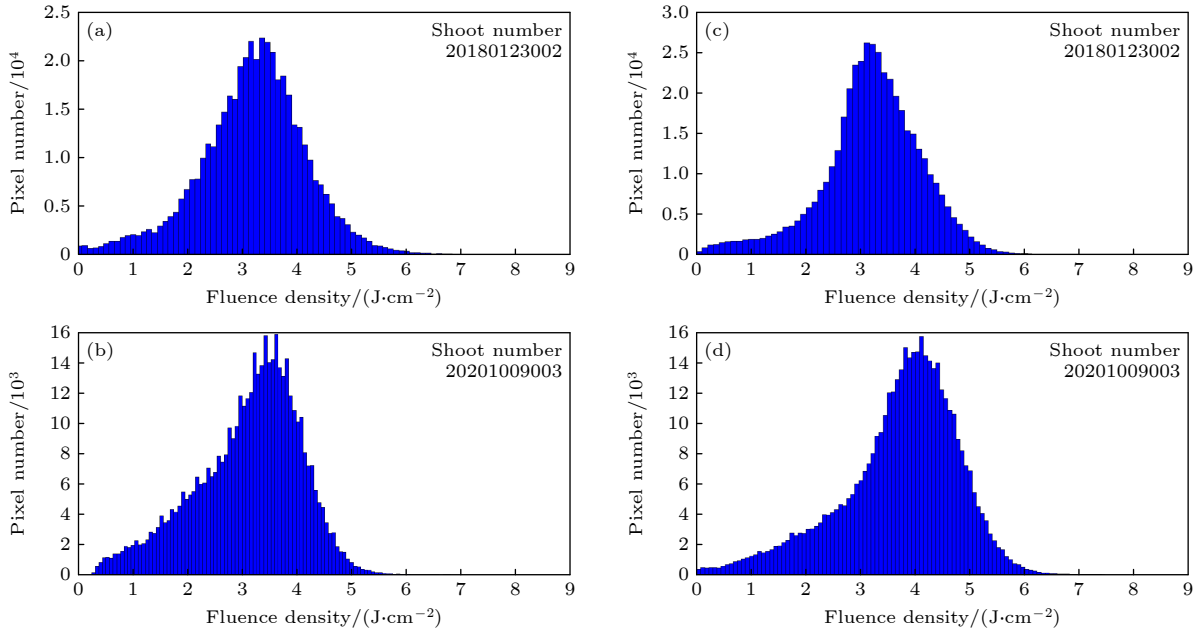


图 7 改进前后高平均功率密度条件下的激光近场功率密度直方图 (a) 第 5 路, 改进前, 输出能量 2790 J/1 ns; (b) 第 5 路, 改进后, 输出能量 2700 J/1 ns; (c) 第 8 路, 改进前, 输出能量 2700 J/1 ns; (d) 第 8 路, 改进后, 输出能量 3238 J/1 ns

Fig. 7. Histogram of the near-field with high average power density before and after improvement: (a) Beam 5, before improvement, with 2790 J/1 ns output; (b) Beam 5, after improvement, with 2700 J/1 ns output; (c) Beam 8, before improvement, with 2700 J/1 ns output; (d) Beam 8, after improvement, with 3238 J/1 ns output.

率密度导致. 尽管如此, 功率密度大于  $5 \text{ GW/cm}^2$  的像素点占比依然从 16.2% 降低到 8.1%, 更进一步说明了主放大器增益提升对激光近场质量的提升效果.

表 7 激光近场峰值功率密度像素点占比  
Table 7. Percentage of pixels for peak power density of the laser near-field.

发次编号	激光束编号	$>4 \text{ GW/cm}^2$ 像素点占比/%	$>5 \text{ GW/cm}^2$ 像素点占比/%
20180123002	Beam 5	18.5	2.9
20201009003	Beam 5	16.5	0.8
20180123002	Beam 8	17.8	16.2
20201009003	Beam 8	45.0	8.1

根据微扰理论, 非线性相移导致的小尺寸调制增长的放大系数会随着调制频率的提高而增大, 结合装置空间滤波器的滤波作用, 非线性作用引起的调制增长在激光近场上会集中在空间滤波器的滤波频率附近. 图 8 进一步比较了第 5 路两次发的近场功率谱密度的分布情况, 可以看出改进前在对应频率  $0.16 \text{ mm}^{-1}$  附近有较强的调制, 这正是非线性相移与空间滤波共同作用的结果 (升级装置空间滤波器小孔对应的滤波范围:  $> 0.16 \text{ mm}^{-1}$ ). 改进后, 该调制被明显抑制, 说明激光近场质量的提升正是由于放大器增益提升降低了  $B$  积分, 从而抑制了小尺寸调制的非线性增长, 而非其他原因.

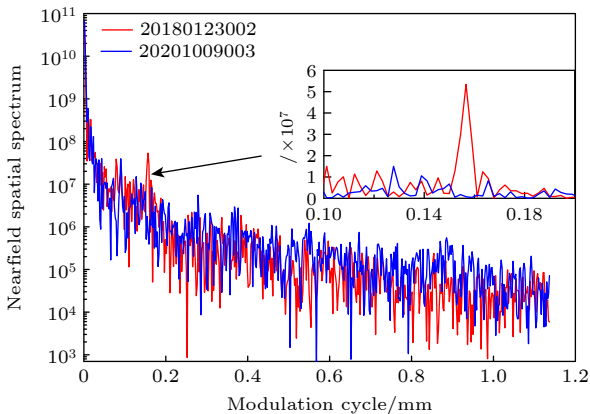


图 8 改进前后第 5 路近场质量分布之功率谱密度曲线  
Fig. 8. Curve of power spectral density before and after improvement for Beam 5.

### 4.3 输出能力

对于脉宽为 5—10 ns 的脉冲而言, 放大器增益能力的提升打破了其受到的钕玻璃储能、增益

饱和、注入反射镜损伤等限制, 从而提高了长脉冲波形下的输出能力. 从南北两大束各选取一路进行了 10 ns 方波脉冲的打靶能力验证. 选取的两束激光主放输出基频能量分别为南路第 3 路 9385 J/10 ns 和北路第 5 路 10218 J/10 ns, 激光近场分布均匀良好, 无明显中高频调制. 第 3 路和第 5 路分别实现了 4580 J 和 4200 J 的三倍频到靶能量, 从而验证了装置在 10 ns 脉冲下三倍频超过 4 kJ 的打靶能力. 选取第 5 路进一步验证基频输出能力, 得到了 12797 J/10 ns 方波基频输出. 实验中用大口径卡计直接测量主放大输出能量, 激光不进入靶场以避免三倍频元件损伤. 对应的激光近场如图 9 所示, 近场对比度为 0.14, 调制度为 1.65, 无明显中高频调制, 证明装置可实现 12.5 kJ/10 ns 以上方波基频安全输出, 与理论预测结果相符.

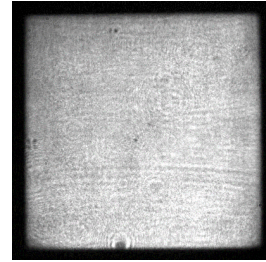


图 9 基频 12797 J/10 ns 末级近场分布

Fig. 9. Distribution of near field of basic frequency under 12797 J/10 ns output.

## 5 结 论

本次神光 II 升级装置在线性能提升论证了新型钕玻璃增益能力, 主放增益性能的提升使装置小信号增益系数从 4.15% cm 增至 4.94% cm, 单路平均小信号增益倍数从 9000 提升到 118000, 改变超过 1 个数量级, 大大降低了前级光路的输出压力和损伤概率, 将基频安全输出能力线从 8.0 kJ 提升到 12.5 kJ. 并在打靶过程中实现了高通量输出下近场质量的改善, 论证了装置 4 kJ/10 ns 三倍频的打靶能力和 12.5 kJ/10 ns 的基频输出能力, 改进后的装置为高能量密度物理提供了更多可能性. 接下来将采取抑制大口径光学元件刀口条纹、加强近场调控能力等措施进一步改善近场质量, 支撑未来基频分光实现 8 路激光扩展为 16 束激光, 最终在不增大单束终端组件损伤压力的前提下实现到靶总能量的大幅增大.

## 参考文献

- [1] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, et al. 2007 *B. M. Appl. Opt.* **46** 3276
- [2] Vivini P, Nicolaizeau M 2015 *Proc. SPIE* **9345** 934503
- [3] Gao Y Q, Zhu B Q, Liu D Z, Peng Z Y, Lin Z Q 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 065204 (in Chinese) [高妍琦, 朱宝强, 刘代中, 彭增云, 林尊琪 2011 物理学报 **60** 065204]
- [4] Touze G L, Cabourdin O, Mengue J F, Guenet M, Grebot E, Seznec S E, Jancaitis K S, Marshall C D, Zapata L E, Erlandson A E 1999 *Proc. SPIE* **3492** 630
- [5] Zhang H, Fan D Y 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2375 (in Chinese) [张华, 范滇元 2001 物理学报 **50** 2375]
- [6] Zhou W Y, Tian J G, Zang W P, Liu Z B, Zhang C P, Zhang G Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 620 (in Chinese) [周文远, 田建国, 臧维平, 刘智波, 张春平, 张光寅 2004 物理学报 **53** 620]
- [7] Stuart B C, Herman S, Rubenchik A M, Shore B W, Perry M D 1996 *Phys. Rev. B* **53** 1749
- [8] Gao Y Q, Ma W X, Zhu B Q, et al. 2013 *IEEE Photonics Conference* Bellevue, WA, USA, September 1, 2013 p73
- [9] Guo A L, Zhu H D, Yang Z P, Li E D, Xie X L, Zhu J Q, Lin Z Q, Ma W X, Zhu J 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 0214001 (in Chinese) [郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 李恩德, 谢兴龙, 朱健强, 林尊琪, 马伟新, 朱俭 2013 光学学报 **33** 0214001]
- [10] Tian C, Shan L Q, Zhou W M, Gao Z, Gu Y Q, Zhang B H 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 125205 (in Chinese) [田超, 单连强, 周维民, 高喆, 谷渝秋, 张保汉 2014 物理学报 **63** 125205]
- [11] Zhang Z, Yuan X H, Zhang Y H, Liu H, Fang K, Zhang C L, Liu Z D, Zhao X, Dong Q L, Liu G Y, Dai Y, Gu H C, Li Y T, Zheng J, Zhong J Y, Zhang J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 155201 (in Chinese) [张喆, 远晓辉, 张翌航, 刘浩, 方可, 张成龙, 刘正东, 赵旭, 董全力, 刘高扬, 戴羽, 谷昊琛, 李玉同, 郑坚, 仲佳勇, 张杰 2022 物理学报 **71** 155201]
- [12] He M Q, Zhang H, Li M Q, Peng L, Zhou C T 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 095201 (in Chinese) [何民卿, 张华, 李明强, 彭力, 周沧涛 2023 物理学报 **72** 095201]
- [13] Wang C, An H H, Xiong J, Fang Z H, Ji Y, Lian C W, Xie Z Y, Guo E F, He Z Y, Cao Z D, Wang W, Yan R, Pei W B 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 195202 (in Chinese) [王琛, 安红海, 熊俊, 方智恒, 季雨, 练昌旺, 谢志勇, 郭尔夫, 贺芝宇, 曹兆栋, 王伟, 闫锐, 裴文兵 2021 物理学报 **70** 195202]
- [14] Xiong J, An H H, Wang C, Zhang Z C, Jiao J L, Lei A L, Wang R R, Hu G Y, Wang W, Sun J R 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 215201 (in Chinese) [熊俊, 安红海, 王琛, 张振驰, 矫金龙, 雷安乐, 王瑞荣, 胡广月, 王伟, 孙今人 2022 物理学报 **71** 215201]
- [15] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, Chen J H 2011 *Principles of Laser* (Vol. 6) (Beijing: National Defense Industry Press) p149 (in Chinese) [周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 陈家骅 2011 激光原理 (第6卷) (北京: 国防工业出版社) 第149页]
- [16] Huang W Q, Zhang Y, Sun X B, Geng Y C, Wang W Y, Liu L Q 2019 *Las. Opt. Pro.* **56** 121403 (in Chinese) [黄晚晴, 张颖, 孙喜博, 耿远超, 王文义, 刘兰琴 2019 激光与光电子学进展 **56** 121403]
- [17] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. 2015 *Fus. Scienc. Techn.* **69** 146
- [18] Wen L, Chen L, Chen W, Hu L L, Wu Y Q 2016 *Opt. Prec. Eng.* **24** 2925 (in Chinese) [温磊, 陈林, 陈伟, 胡丽丽, 吴谊群 2016 光学精密工程 **24** 2925]
- [19] Peng Z T, Jing F, Liu L Q, Zhu Q H, Chen B, Zhang K, Liu H, Zhang Q Q, Cheng X F, Jiang D B, Liu H J, Peng H S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 87 (in Chinese) [彭志涛, 景峰, 刘兰琴, 朱启华, 陈波, 张昆, 刘华, 张清泉, 程晓峰, 蒋东铤, 刘红婕, 彭翰生 2003 物理学报 **52** 87]
- [20] Zhao J P 2006 *M. S. Thesis* (Chengdu: Sichuan University) (in Chinese) [赵军普 2006 硕士学位论文 (成都: 四川大学)]



# Improvement of fundamental frequency performance of SGII-UP laser facility\*

Xie Jing   Wang Li   Liu Chong   Zhang Yan-Li   Liu Qiang  
Wang Tao   Chai Zhi-Hao   Xia Zhi-Qiang   Yang Lin  
Zhang Pan-Zheng<sup>†</sup>   Zhu Bao-Qiang

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

( Received 20 April 2023; revised manuscript received 18 August 2023 )

## Abstract

The SGII-UP laser facility is one of the most important high power laser systems in China, and it is also one of a few inertial confinement fusion laser devices that operate all year round in the world. In order to further improve its output capacity to meet higher physical requirements, measures such as increasing the number of neodymium glasses, adopting new N41 neodymium glasses, and improving the energy configuration of xenon lamps are taken to improve the gain capacity of the main amplifier. Calculation of the new main amplifier construction model predicts that the small gain coefficient will reach 4.9%. And further modulation of the laser device shows that when the output of 10 kJ fundamental frequency energy is needed, the injection energy decreases from 5 J to 1.26 J, which supports a higher output energy and a stronger basic frequency output capability. Furthermore, it is analyzed that under different laser pulse injection conditions of 1, 5, 10 ns, the  $B$  integral is obviously reduced, which means that the near-filed quality of the beams is better. According a small-size modulation suppression is induced by nonlinear phase shift, and high-fluence laser is expected to pass before and after the improvement, which is a key prerequisite for a higher output energy. Based on these analyses, fundamental frequency output energy values with different pulse injections are calculated and an improvement from 8 kJ to 12.5 kJ output is expected under 10 ns square pulse condition. Tests show that the small signal gain coefficient of the device increases from 4.15% cm to 4.94% cm, which is consistent with simulation results, and the average gain multiple of a single beam increases from 9000 to 118000, which is an order of magnitude higher. The output verifies the fundamental frequency output capacity exceeding 12.5 kJ under 10 ns square pulse as well as a small-size modulation suppression around  $0.16 \text{ mm}^{-1}$  as a result of joint action of non-linear phase shift and spatial filtering. After the significant improvement, the SGII-UP laser facility will strongly support more ambitious physical experiment targets.

**Keywords:** high power laser, laser fusion, output capacity

**PACS:** 42.60.-v, 42.60.Lh, 42.60.Jf, 42.82.Bq

**DOI:** [10.7498/aps.72.20230643](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230643)

\* Project supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. XDA25010100).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [nwpuzhangpanzheng@163.com](mailto:nwpuzhangpanzheng@163.com)

## 神光II升级激光装置基频输出能力提升

谢静 王利 刘崇 张艳丽 刘强 汪涛 柴志豪 夏志强 杨琳 张攀政 朱宝强

## Improvement of fundamental frequency performance of SGII-UP laser facility

Xie Jing Wang Li Liu Chong Zhang Yan-Li Liu Qiang Wang Tao Chai Zhi-Hao Xia Zhi-Qiang  
Yang Lin Zhang Pan-Zheng Zhu Bao-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 194202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230643

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230643>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

高功率激光辐照平面靶后辐射冷却效应对等离子体成丝的影响

Influence of radiative cooling effect on the plasma filamentations in the interaction of high-power laser with planar targets

物理学报. 2022, 71(23): 235202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220870>

收集振动能的摩擦纳米发电机设计与输出性能

Design and output performance of vibration energy harvesting triboelectric nanogenerator

物理学报. 2019, 68(19): 190201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190806>

神光III主机上球腔辐射场实验的三维数值模拟与分析

Three-dimensional simulations and analyses of spherical hohlraum experiments on SG III laser facility

物理学报. 2018, 67(2): 025202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20170521>

基于基频放大的紫外皮秒355 nm输出效率提升系统

Ultraviolet picosecond conversion efficiency improvement system at 355 nm based on fundamental frequency laser amplified

物理学报. 2019, 68(20): 200601 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190876>

高压高应变率加载下多晶相变的原位X射线衍射

*In situ* observation of phase transition in polycrystalline under high-pressure high-strain-rate shock compression by X-ray diffraction

物理学报. 2020, 69(24): 246201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200929>

高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备

Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication

物理学报. 2020, 69(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191787>