

高通量脉冲三倍频激光参数精密诊断

何荣斌^{1,2}, 刘崇^{1*}, 季来林³, 刘栋³, 朱宝强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中国科学院大学, 北京 100049;

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 利用神光 II 升级装置的三倍频激光参数精密诊断系统, 对类美国国家点火装置(NIF)的激光驱动器在高通量状态下的空间、时间及能量等三倍频激光参数进行了测量, 并通过提高近场分辨率, 对在终端光学系统石英元件加工过程中引入的相位型周期结构进行了确认。对高通量状态下终端光学系统的远场聚焦能力和近场传输调制特性进行了研究。结果表明, 相位型周期结构是引起三倍频近场调制增强的重要原因之一。

关键词 激光光学; 激光参数; 精密诊断系统; 三倍频; 损伤

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901007

Precision Diagnosis of Third-Harmonic Laser Parameters of High-Flux Pulse

He Rongbin^{1,2}, Liu Chong¹, Ji Lailin³, Liu Dong³, Zhu Baoqiang¹

¹Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China

Abstract The third-harmonic laser parameters of a laser driver similar to U.S. National Ignition Facility (NIF) in a high laser-flux state, such as space, time and energy, are measured by using the third-harmonic precision diagnostic system of Shenguang II (SGII) upgraded facility. The phase-type periodic structure introduced in the machining process of the quartz components of the terminal optical system is confirmed by improving the near-field resolution. The far-field focusing ability and the near-field transmission modulation characteristics of the terminal optical system in a high laser-flux state are studied. The results show that the phase-type periodic structure is an important reason which can result in an enhancement of third-harmonic near-field modulation.

Key words laser optics; laser parameters; precision diagnostic system; third-harmonic generation; damage

OCIS codes 140.3538; 140.3295; 140.3330

1 引言

作为惯性约束聚变(ICF)物理研究的一种重要手段, 高功率激光驱动器技术得到了迅速发展。相关国家进行了大量研究。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)依次建成了 Janus、Nova、Beamlet 等激光装置, 分别用于聚变模拟代码改进、大口径光学元件设计、非线性光学效应评估等^[1]。2009 年, 美国国家点火装置(NIF)研制完成, 成为目前世界上输出能力最强、规模最大的激光装置, 其 192 路激光可输出的三倍频(3ω , ω 为入射光频率)激光总能量为 1.8 MJ, 峰值功率达到 500 TW, 通量密度接近 $7 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。日本及部分

收稿日期: 2017-03-24; 收到修改稿日期: 2017-04-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0401102)

作者简介: 何荣斌(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率激光参数测量方面的研究。E-mail: hrb19920706@gmail.com

导师简介: 朱宝强(1966—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事高功率激光参数测量、高效谐波转换技术方面的研究。

E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: liuchong431@126.com

欧洲国家也开展了相应研究^[2-4]。

随着激光驱动器输出能力的不断提高, 3ω 激光损伤逐渐成为制约激光器能力提升的重要障碍之一。研究表明, 在高通量状态下, 激光放大过程引起的波前畸变会影响基频近场均匀性^[5-6], 不可避免地造成 3ω 近场通量对比度的恶化; 污染物、喷溅物等小尺度振幅型物体造成的下游光束局部强度调制, 可能诱发小尺度自聚焦等非线性过程的产生, 进而导致光束局部调制增强^[7]; 光学元件在加工过程中存在的应力、表面疵病、亚表面缺陷, 以及特定加工工艺带来的周期性结构等相位型缺陷在某些特殊的传输距离上会产生较强的 3ω 强度调制^[8-9]。随着通量密度的不断提高, 上述因素将成为 3ω 激光损伤的重要诱因, 并严重制约远场聚焦能力和系统负载能力的进一步提升。1996年, 美国 LLNL 在 Beamlet 装置上研发了一种焦平面诊断(FPD)系统^[10], 2007年, 美国 LLNL 完成了 NIF 的 3ω 激光参数精密诊断系统的研制。国内神光Ⅲ装置的 3ω 激光参数精密诊断系统采用了一种平行光束分光取样衰减测量方案^[11-12], 但该方案未对终端光学系统的焦平面以及 3ω 近场面进行有效成像, 其 3ω 远场焦斑诊断系统采用椭球面作为成像系统^[13], 其高通量实验数据未见报道。2015年, 神光Ⅱ驱动器升级装置的 3ω 激光参数精密诊断系统(PDS)研制完成^[14], 升级系统第二路的 3ω 近远场得到有效采集。

为了进行高通量激光物理实验, 上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室搭建了四程腔放加助推放大激光驱动器(类 NIF 激光驱动器)。目前, 其单路激光基频最大输出通量密度达到 $19.4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, 受限于光学元件损伤等因素, 3ω 激光通量密度局限于 $3\sim 4 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。基于该类 NIF 激光驱动器, 利用神光Ⅱ驱动器升级装置的 3ω 激光参数精密诊断系统对通量密度大于 $2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的 3ω 脉冲的空间和时间参数进行了综合测试。利用 3ω 脉冲的空间参数测量数据, 对高通量运行状态下终端光学系统的远场聚焦能力和近场传输调制特性进行了研究。

2 神光Ⅱ驱动器升级装置的 3ω 激光参数精密诊断系统

神光Ⅱ驱动器升级装置的 3ω 激光参数精密诊断系统主体部分由终端光学系统和 Cassegrain 成像系统组成。终端光学系统^[7]如图 1 所示, 由连续相位板、基频窗口、倍频器、楔形透镜、光束取样光栅(BSG)、主碎片防护板和次碎片防护板组成, 通过 I + II 类磷酸二氢钾(KDP)晶体进行谐波转换, 而后由楔形透镜实现聚焦与色分离, 楔形透镜焦距 f 为 4500 mm, F 数约为 14.5。

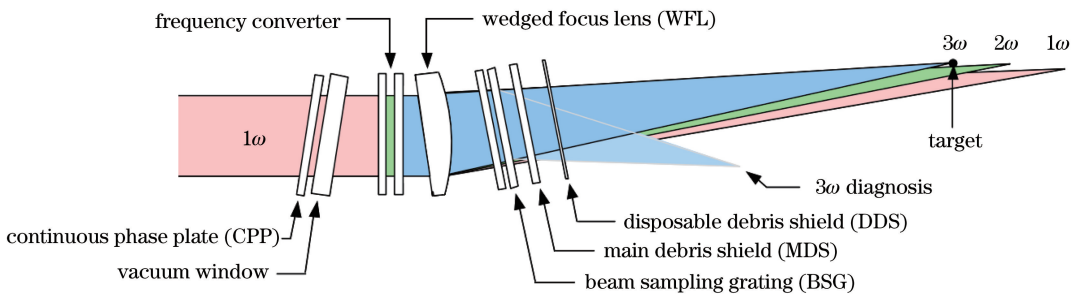


图 1 神光Ⅱ升级装置终端光学系统示意图^[7]

Fig. 1 Diagram of terminal optical system of SGII-upgraded facility^[7]

利用由三块不镀膜的球面反射镜(M1、M2、M3)组成的折叠式 Cassegrain 反射成像系统对终端光学系统焦平面附近的区域进行精确成像, 以实现 3ω 脉冲近场和远场参数的测量。该成像系统与终端光学系统共焦, 如图 2 所示, 其中 R 为曲率半径。在反射式成像系统的末段光路中插入 5 块取样镜进行分光, 分别实现远场、全口径近场、高分辨率近场、能量以及时间波形的测量。

利用上述精密诊断系统测量了神光Ⅱ驱动器升级装置第二路的 3ω 近远场, 并对成像系统的品质因子进行了标定, 其品质因子约为 84%, 能量集中于 3.8 倍衍射极限(3.8DL), 即 351 nm 处^[14]。

3 实验结果及分析

3.1 远场测量结果

实验过程中, 利用导光反射镜将四程腔放加助推放大激光驱动器的基频脉冲导入 3ω 激光参数精密诊

断系统中。使用 16 bit 图像传感器(CCD)对 3ω 远场焦斑进行采集。如图 3 所示, 3ω 远场焦斑的约 80% 能量集中在 21DL 内。

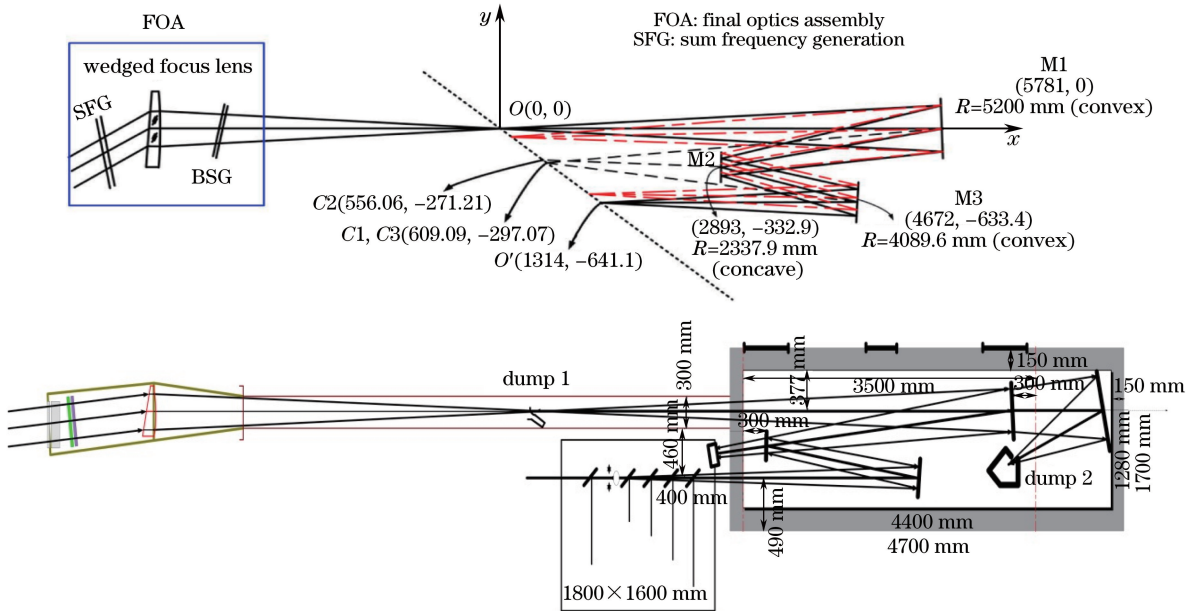


图 2 神光 II 驱动器升级装置 3ω 激光参数精密诊断系统。(a)示意图;(b)光路排布

Fig. 2 3ω laser-parameter precision diagnostic system of SGII-upgraded facility. (a) Diagram; (b) optical path arrangement

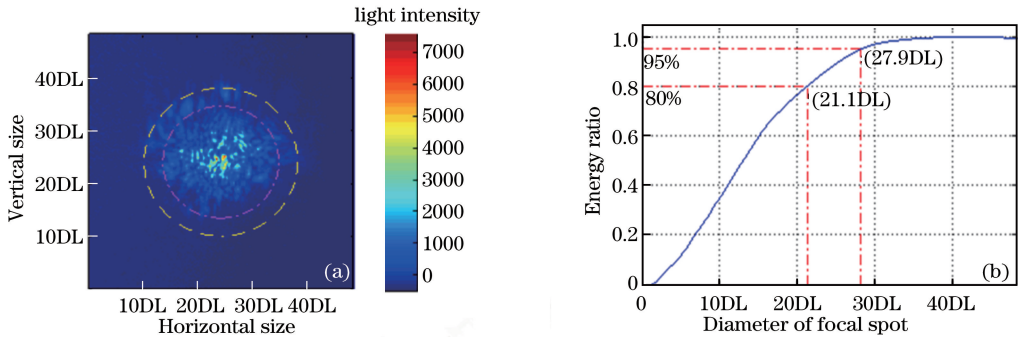


图 3 类 NIF 驱动器的 3ω 远场焦斑。(a)强度分布;(b)环围能量积分图

Fig. 3 3ω far-field focal spot of high power driver similar to NIF. (a) Distribution of intensity; (b) encircled-energy integral diagram

考虑到成像系统品质因子约为 3.8DL^[14], 故系统误差对测量结果的影响可以忽略。实验数据表明, 当 3ω 激光脉冲通量密度约为 $2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时, 对应的基频远场焦斑约 80% 能量集中在 10.8DL 以内, 如图 4 所示。

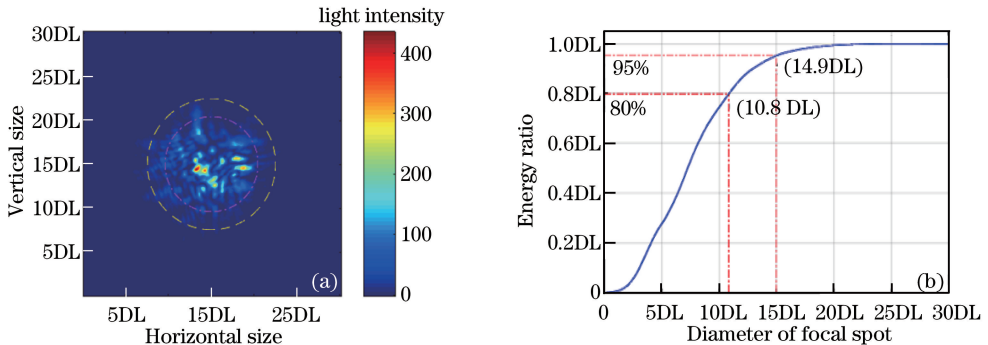


图 4 3ω 激光脉冲通量密度为 $2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时的基频远场焦斑。(a)强度分布;(b)环围能量积分图

Fig. 4 1ω far-field focal spot when flux density of 3ω laser pulse is $2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$.

(a) Distribution of intensity; (b) encircled-energy integral diagram

在基频焦斑测量过程中,过高的衰减片倍率导致基频远场焦斑光强峰值灰度仅为 400 左右,测量结果劣于真值。在实际工程中, 3ω 焦斑衍射极限倍数未明显超出基频焦斑衍射极限倍数的 3 倍,即认为诊断系统不存在明显像差。因此, 3ω 激光参数诊断系统获得的远场焦斑真实可信。

3.2 近场测量结果

3ω 近场是衡量脉冲光束质量的重要指标之一,在一定程度上与石英元件的损伤特性相关。实验中,利用 30 倍缩束系统采集 3ω 脉冲的全口径近场数据。图 5(a)为平均通量密度约为 $2 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的 3ω 脉冲的近场分布,取绿色方框内区域(方框边长长度为全口径边长度的 84%),其通量对比度约为 0.35,调制度约为 2.48。

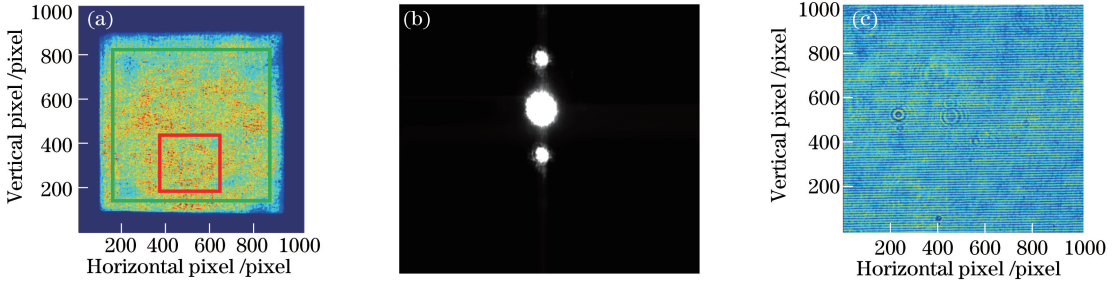


图 5 近场测量结果。(a) 3ω 脉冲全口径近场数据;(b)终端光学系统焦平面上的 3ω 模拟光远场焦斑;(c)局部区域高分辨率近场数据

Fig. 5 Near-field measurement results. (a) Full-diameter near-field data of 3ω pulse; (b) simulated far-field focal spot of 3ω pulse at focal plane of terminal optical system; (c) high resolution near-field data in local area

测量过程中发现,近场数据在水平方向上存在周期性的强度调制,这与图 5(b)所示的终端光学系统焦平面上的 3ω 模拟光远场分布吻合,但调制周期接近全口径近场数据分辨极限。为进一步确认该周期结构,采用缩束比为 1:6 的高分辨率局部区域近场测试功能设计实验装置,所得局部区域[图 5(a)所示红色方框区域]的测试数据如图 5(c)所示。根据 CCD 像面尺寸和缩束比计算可得,像面周期尺度约为 $160 \mu\text{m}$,即物方周期尺度约为 $960 \mu\text{m}$,调制周期与 BSG 表面所观测到的损伤形貌周期高度吻合。利用高分辨率干涉仪得到楔形透镜透射波前,楔形透镜的相位型周期结构清晰可见,其功率谱峰值出现在一个调制周期处,与高分辨率近场数据吻合,如图 6 所示,可以发现楔形透镜引入了该周期结构。

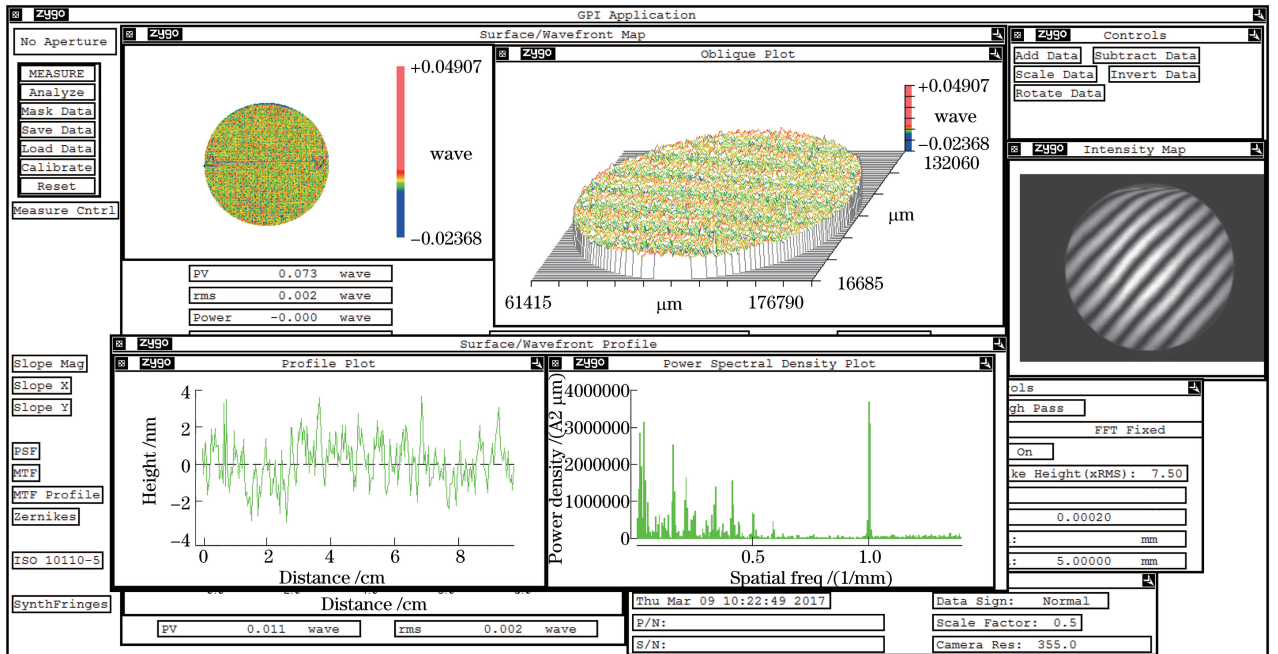


图 6 楔形聚焦透镜局部区域干涉仪波前

Fig. 6 Interferometer wavefront of local areas of wedged focus lens

对楔形透镜相位型周期结构所诱发的 3ω 近场传输调制特性进行了进一步分析。根据干涉仪得到的楔形透镜波前数据,利用单振幅平面波作为初始条件,模拟了同等周期结构在近泰伯距离位置对 3ω 近场的调制情况,如图 7 所示。如图 7(a)所示,调制度仅为 0.3,不足以引起 3ω 近场后续传输的强度调制。但如图 7(b)所示,近场光强强区峰值点的强度是均值(红线所示位置,约为 1860 J)的 2 倍以上,足以影响后续石英元件的安全运行。其偏差在于模拟过程中未考虑基频近场强度调制与波前信息,该现象的物理机制有待进一步研究。

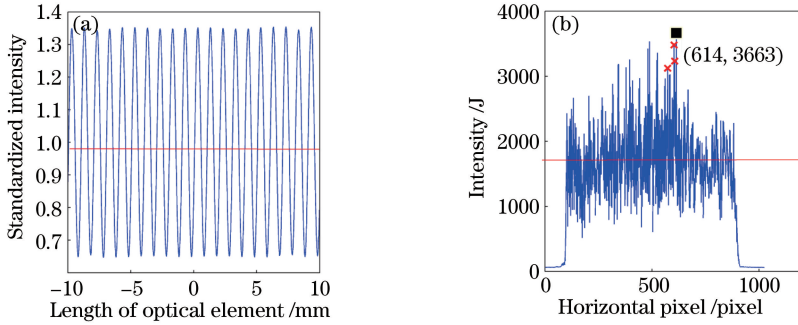


图 7 相位型周期结构对 3ω 近场强度调制的影响。(a)模拟结果;(b)实际测量结果
Fig. 7 Influences of phase-type periodic structure on 3ω near-field intensity modulation.
(a) Simulated result; (b) actual measurement result

3.3 时间波形测量结果

方波脉冲有利于高通量状态下高效 3ω 过程以及近场传输与演化的研究,本次实验均采用 3 ns 方波。使用示波器 (WaveRunner 610zi, LeCroy 公司,美国) 进行测量,平顶区域平均电压为 1.8 V,起伏约为 0.2 V,得到的 3ω 时间波形形态良好。实验所用方波接近 3 ns 理想方波,结果如图 8 所示。

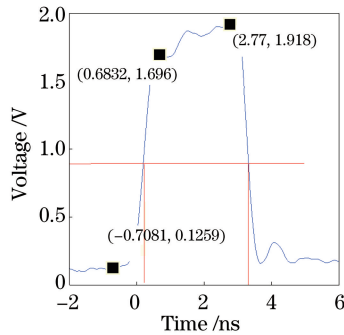


图 8 时间波形
Fig. 8 Temporal waveform

4 结 论

在前期工作的基础上,进一步完善了神光 II 升级装置的 3ω 激光参数精密诊断系统的功能。利用该系统获得了类 NIF 激光驱动器在较高通量密度工作状态下的 3ω 近场和远场焦斑数据。利用远场品质因子为 3.8DL 的成像系统测量发现,1853 J 的 3ω 脉冲远场焦斑约 80% 能量集中在 21DL 以内,与对应的基频远场能量集中度较吻合。获得了全口径低分辨率 3ω 近场数据,分析结果显示, 3ω 近场通量对比度约为 0.35, 3ω 近场较基频近场有一定程度的恶化。设计了分辨率接近 250 μm 的高分辨率近场测量功能,通过局部区域高分辨率近场测量数据发现,楔形透镜透射波前引入了周期约为 1 mm、深度约为 7 nm 的相位型周期结构。该结构是引起 3ω 激光近场调制增强的重要原因之一,实验数据与结论对高功率激光装置高通量运行状态下的后续改进具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Adams R, Anderson A, Aragon R, *et al.* Advanced conceptual design report for the z-beamlet laser backlighter system [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.
- [2] Cavailler C. Inertial fusion with the LMJ[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2005, 47: B389-B403.
- [3] Kodama R, Shiraga H, Shigemori K, *et al.* Nuclear fusion: Fast heating scalable to laser fusion ignition[J]. Nature, 2002, 418(29): 933-934.
- [4] Izawa Y, Mima K, Azechi H, *et al.* Laser fusion research with GEKKO XII and PW laser system at Osaka[C]. Vilamoura: 20th IAEA Fusion Energy Conference, 2004.
- [5] Wegner P J, van Wonterghem B M, Dixit S N, *et al.* Characterization of third-harmonic target plane irradiance on the National Ignition Facility Beamlet demonstration project[C]. Annual meeting of the American Nuclear Society, 1997.
- [6] Wegner P J, Barker C E, Caird J A, *et al.* Third-harmonic performance of the Beamlet prototype laser[C]. SPIE, 1997, 3047: 370-380.
- [7] Wegner P, Auerbach J, Biesiada T, *et al.* NIF final optics system: Frequency conversion and beam conditioning[C]. SPIE, 2004, 5341: 180-189.
- [8] Ji Lailin, Liu Chong, Tang Shunxing, *et al.* Phase perturbation of large aperture KDP crystal manufacture and effects on third harmonics generation[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502012.
季来林, 刘 崇, 唐顺兴, 等. 大口径 KDP 晶体加工相位扰动与三次谐波转换[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502012.
- [9] Wang Hongxiang, Shen Lu, Li Chengfu, *et al.* Analysis and experiment investigation of laser induced damage of optics [J]. Chinese J Lasers, 2017, 44(3): 0302006.
王洪祥, 沈 璐, 李成福, 等. 光学元件激光诱导损伤分析及实验研究[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302006.
- [10] Caird J A, Nielsen N D, Patton H G, *et al.* Beamlet focal plane diagnostic[C]. SPIE, 1997, 3047: 239-247.
- [11] Xia Yanwen, Zheng Kuixing, Da Zhengshang, *et al.* Laser parameter precision diagnostic system of large-aperture high power laser experiment platform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 1217008.
夏彦文, 郑奎兴, 达争尚, 等. 大口径高通量验证实验平台的激光参数精密诊断系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(12): 1217008.
- [12] Sun Zhihong, Lü Jiakun, Zhang Bo, *et al.* Temporal profile measurement of frequency tripled beam for high power laser facility[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0308001.
孙志红, 吕嘉坤, 张 波, 等. 高功率激光装置三倍频脉冲时间波形测量技术[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0308001.
- [13] Li Dongming. Research on optical design and key technology of Shenguang III far field diagnostic system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004: 16-41.
李东明. 神光 III 远场诊断系统光学设计及关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 16-41.
- [14] Liu C, Ji L, Yang L, *et al.* Studies on design of 351 nm focal plane diagnostic system prototype and focusing characteristic of SGII-upgraded facility at half achievable energy performance[J]. Applied Optics, 2016, 55(10): 2800-2812.