

文章编号: 0258-7025(2008)09-1328-05

# 神光 II 升级装置终端光学组件的排布设计

乔战峰 卢兴强 赵东峰 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国家实验室, 上海 201800)

**摘要** 设计高功率激光装置靶场终端光学组件(FOA)时考虑的重要因素是鬼像对光学元件的破坏。由于神光 II 升级装置(SG-II-U)的输出能量高、靶场空间小、鬼像分布情况复杂,导致了终端光学组件的设计难度很高。用自主研发的鬼像控制设计软件对神光 II 升级装置靶场终端光学组件排布进行设计,给出了进行鬼像控制设计时需考虑的设计因素,并对比研究了两种靶场终端光学组件设计方案的优缺点,最后结合神光 II 升级装置的特点,优化设计出神光 II 升级装置靶场终端光学组件的最终排布方案。

**关键词** 光学器件;神光 II 升级装置;鬼像分析;终端光学组件;排布设计

**中图分类号** TN 242 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1328

## Arrangement Design of the Final Optics Assembly for the SG-II Upgrading Laser

Qiao Zhanfeng Lu Xingqiang Zhao Dongfeng Zhu Baoqiang

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

**Abstract** It is important to keep away from the ghost reflection point for the arrangement design of final optics assembly (FOA) in the high power laser facility. The high power output of the "SG-II" upgrading laser, limited target field space and complicated ghost reflection distribution lead to the difficult design of the FOA. By using the ghost image analysis software designed by ourselves, we analyzed the ghost reflection distribution of the FOA. Then, the arrangement of two types of designs for the FOA was optimized. According to the characteristics of "SG-II" upgrading laser, we obtained the design for the FOA, which can satisfy the system requirement exactly.

**Key words** optical devices; "SG-II" upgrading laser; ghost reflection analysis; final optics assembly; arrangement design

### 1 引言

神光 II 升级装置(SG-II-U)是为研究激光惯性约束核聚变(ICF)而建造的大型高功率激光装置,它包含了多个光学子系统,每个子系统都由若干光学元件组成;其中对传输激光起反射作用的称为反射式光学元件,起透射作用的称为透射式光学元件。透射式光学元件在使用中要镀增透膜,以保证激光通过它时有比较小的透射能量损耗。光学元件的增透膜在实际制作时并不能做到很完美,它对入射的

激光通常情况下至少存在0.5%的反射,这些被透射式光学元件反射的剩余激光,如果在系统中的某些地方汇聚后形成激光焦点,就是通常所说的鬼像。在高功率激光装置中,由光学元件产生的1阶鬼像具备的能量可以达到几十焦耳,能够打坏任意一块放在鬼像位置上的光学元件<sup>[1~4]</sup>。因此,回避鬼像是大型高功率激光装置靶场终端光学排布中要解决的一个重要问题。在美国的NIF国家点火激光装置中,包含192路靶场终端光学组件,共有1344块

收稿日期:2008-01-15;收到修改稿日期:2008-03-10

基金项目:国家自然科学基金(60707019)和中日韩激光聚变高能量密度物理合作项目资助课题。

作者简介:乔战峰(1974—),男,河南人,硕士研究生,主要从事高功率激光装置靶场单元技术方面的研究。

E-mail: zhanfeng\_qiao@yahoo.com.cn

导师简介:朱宝强(1966—),男,浙江人,研究员,硕士生导师,主要从事高功率激光非线性技术方面的研究。

E-mail: baoqzhu@siom.ac.cn

大口径光学元件, 这些光学元件分布在半径约 10 m 的球形空间内, 可产生 300 万(其中对光学元件有破坏力的鬼像有 24000 个)个 4 阶以上的鬼像<sup>[5]</sup>。可见, 在非常有限的空间范围内回避掉所有有破坏力的鬼像, 并把靶场终端光学组件排布好是一个令靶场设计人员头疼的问题, 神光 II 升级装置靶场终端光学组件的排布设计也是一项有挑战性的工作。

本文先给出神光 II 升级装置靶场终端光学组件的作用、排布特点和设计时要解决的困难, 然后研究排布靶场终端光学组件时要遵循的鬼像回避原则, 最后优化鬼像控制设计并给出神光 II 升级装置将采用的靶场终端光学排布方案。

## 2 终端光学组件的特点

高功率激光装置末级输出的激光在打靶时要先通过靶场的导光反射镜引导进入靶场终端光学组件, 然后经终端光学组件中的打靶透镜汇集于真空靶室进行打靶, 其间终端光学组件起到的最基本作用就是密封真空和激光会聚。

靶场终端光学组件中包含的光学元件种类与高功率激光器件的能量输出密切相关; 在单路激光输出能量较低的情况下, 谐波转换元件(即倍频、三倍频晶体)通常置于靶场最后一块反射镜前面, 通过对最后一块反射镜的膜层设计, 分离出剩余没有转换的基频、二倍频激光以及少量的三倍频激光, 作为测试信号使用, 导入靶室的只有三倍频激光(如现有的神光 II 激光装置)。在这种情况下, 终端光学组件通常包括起密封作用的靶室窗口、打靶透镜和保护打靶透镜的防溅射板, 如图 1 所示。

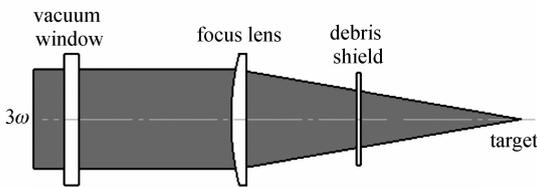


图 1 神光 II 装置靶场终端光学元件设计排布图

Fig. 1 Arrangement design of the final optics assembly for SG-II laser

图 1 所示终端光学组件的光学元件种类较少, 产生的鬼像数目就会相应地减少, 并且一般情况下其光学元件的排布空间都很宽敞, 终端光学元件的排布设计不是一件非常困难的事情。

神光 II 升级装置激光输出能力比现有的神光 II 装置要高出许多, 由于三倍频反射膜层的破坏阈值

低(约为  $1 \text{ J/cm}^2$ ), 传统的谐波分离方式不再适用, 要采用楔形板结合聚焦透镜的谐波分离方案<sup>[6]</sup>才能满足要求。但这种新的谐波分离方式会给神光 II 升级装置靶场终端光学组件的设计带来两方面问题:

1) 终端光学组件内光学元件种类繁多, 导致终端光学组件的鬼像分布形式复杂, 终端光学组件排布设计难度增加。

神光 II 升级装置靶场终端光学组件的基本结构排布如图 2 所示, 图中包括的光学元件为: 起高效谐波转换作用的三倍频器, 起谐波分离和真空密封作用的楔形板, 起小焦斑束匀滑作用的专用相位板(DPP), 起光束聚焦作用的打靶透镜, 起测量采样作用的射束分离光栅(BSG)以及保护作用的防溅射板等。可以看出神光 II 升级装置靶场终端光学组件要比神光 II 靶场终端光学组件设计复杂。由于三倍频器置于终端光学组件内, 剩余没有转换的基频、二倍频激光进入靶室, 又增加了二倍的鬼像。

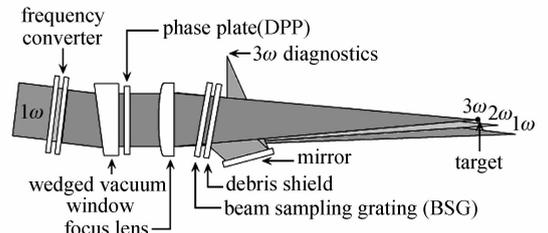


图 2 神光 II 升级装置靶场终端光学组件排布示意图  
Fig. 2 Arrangement design of the final optics assembly for SG-II upgrading laser

2) 和美国的国家点火装置 NIF 相比, 神光 II 升级装置靶场终端光学组件产生的鬼像更具破坏力。

由于现有神光 II 升级靶场空间尺寸的限制, 打靶透镜的焦距不可能设计得太长, 神光 II 升级装置的终端光学元件基本上都位于  $R = 2400 \text{ mm}$  的球内, 这导致靶场终端光学组件的低阶鬼像具备的能量密度更高, 对终端光学组件的设计带来更大的挑战。表 1 为美国 NIF 装置与神光 II 升级装置基本技术参数的对比。

从表 1 可以看出, 虽然美国 NIF 装置的最大能量密度为神光 II 升级装置的最大能量密度的 1.73 倍, 但其打靶靶镜  $F$  数为神光 II 升级装置打靶透镜  $F$  数的 3.39 倍, 造成产生的各阶鬼像能量密度比美国 NIF 装置相应阶鬼像的能量密度高很多, 意味着在终端光学组件的鬼像控制设计上, 神光 II 升级装置的终端光学组件排布设计时各光学元件的位置选择相比 NIF 更加困难。

表 1 美国 NIF 装置与神光 II 升级装置基本技术参数的对比

Table 1 Comparison of the basic parameters between NIF and SG-II upgrading

	USA, NIF <sup>[5]</sup>	SG-II upgrading
Limited output	$1.0 \times 10^4 \text{ J}/3 \text{ ns}/3\omega$	$4.0 \times 10^3 \text{ J}/3 \text{ ns}/3\omega$
Energy fluence	$7.25 \text{ J}/\text{cm}^2$	$4.16 \text{ J}/\text{cm}^2$
Foci of final focus lens	$7.7 \times 10^3 \text{ mm}$	$1.9 \times 10^3 \text{ mm}$
Final focus lens ( $F$ )	14.6	4.3
The 4 <sup>th</sup> ghost reflection's peak energy fluence when pluse width changed	$2 \text{ J}/\text{cm}^2$	6.7 times than NIF's in anlysis

### 3 终端光学组件的鬼像控制设计分析

神光 II 升级装置靶场终端光学组件的排布设计是采用自主研发的软件 Laser designer 和 Lens designer 来共同完成的,这两个软件类似美国利弗莫尔国家实验室编写的软件 PROP92<sup>[7]</sup>,也是针对高功率激光系统的设计而编写的,采用描述高斯光束和球面波传输的 ABCD 矩阵理论模型<sup>[8]</sup>来完成鬼像控制设计。Laser designer 和 Lens designer 在神光 II 第九路系统工程实施和性能改进过程中,已用来完成能流分布计算、空间滤波器透镜设计计算和鬼像控制设计计算,计算结果也在实际实验中得到了验证(本软件的更详细情况请参考 <http://blog.csdn.net/laserdesigner>)。

为了确保终端光学元件在高通量运行情况下的安全,按照在打靶透镜焦距 1900 mm,实验运行输出能量  $3000 \text{ J}/3 \text{ ns}/3\omega$ ,终端光学元件 1% 剩余反射率(主要是考虑到光学元件上膜层的退化,使得表面剩余反射率增加),光学元件或膜层破坏阈值为  $10 \text{ J}/\text{cm}^2$  情况下,经过计算,确定了如下两项终端光学组件内光学元件基本的排布设计原则:1) 在终端光学组件内,1 阶鬼像位置附近  $\pm 95.5 \text{ mm}$  及 2 阶鬼像位置附近  $\pm 1.2 \text{ mm}$  范围内不能放置光学元件;2) 在终端光学组件内,3 阶和 4 阶鬼像的破坏范围很小,要求其不能落在光学元件内部。

神光 II 升级装置的靶场终端光学元件有 7 个,不仅要在  $380 \text{ mm} \times 380 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$  左右的空间内排布好,还要保证这 7 个光学元件的 14 个激光反射面的反射激光产生的 1~4 阶鬼像不落在光学元件内部,以免产生破坏。鬼像数量多,空间狭小是神光 II 升级装置靶场终端光学组件设计碰到的最大困难。设计好神光 II 升级装置的终端光学组件,必须先仔细分析鬼像产生和分布规律,然后再巧妙地把光学元件排布好。以回避  $3\omega$  激光产生的鬼像为例,分析比较两种设计方案的优缺点。

设计方案 1 如图 3 所示,该方案把光路中的所有光学元件都按垂直光轴的状态放置,不倾斜。这样做的优点是只有楔形板的一个反射面产生的少量鬼像点落在光路外面,其他大部分鬼像点都集中在光轴附近。因此该方案对打到侧壁上的杂散光管理要求不高,但由于光学元件在轴上产生的鬼像数量众多,分布形式复杂,很不容易在狭小空间内把光学元件排布好。进一步的分析表明,该方案完全回避 1~4 阶鬼像时,要求打靶透镜的焦距越长,光学元件排布空间越大越好。

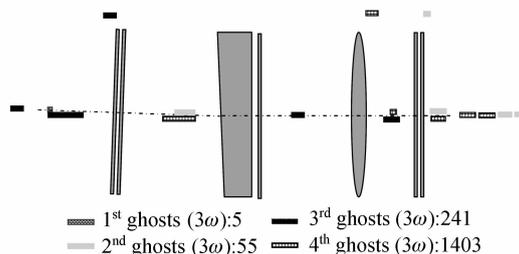


图 3 神光 II 升级装置靶场终端光学组件排布方案 1 的鬼像分布形态

Fig. 3 Ghost image distribution for the arrangement project 1 of the final optics assembly for SG-II upgrading laser

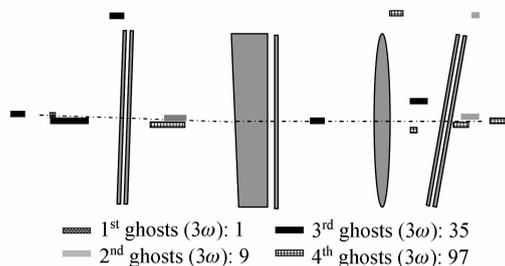


图 4 神光 II 升级装置靶场终端光学组件排布方案 2 的鬼像分布形态

Fig. 4 Ghost image distribution for the arrangement project 2 of the final optics assembly for SG-II upgrading laser

设计方案 2 如图 4 所示,该方案把光路中起测

量采样作用的 BSG 以及保护作用的防溅射板沿光轴方向以一定的角度倾斜放置, 让它们产生的反射激光打到侧壁上。其优点是大大减少了落在光轴附近的鬼像点数量, 有利于在更狭小的空间内排布好终端光学组件; 缺点是有很多鬼像点打到了终端光学组件的侧壁上, 为靶室杂散光的管理提出了更高的要求, 同时光学元件倾斜放置不利于提高光束质量。

考虑到神光 II 升级装置靶场空间有限, 打靶透镜焦距不可能设计得很长, 方案 2 可以最大限度地减少鬼像数量, 节省终端光学组件空间, 因此, 非常适合于神光 II 升级装置靶场终端光学组件的设计。

#### 4 优化设计的神光 II 升级终端光学组件排布

在优化终端光学组件时要考虑的因素为: 1) 不仅要同时回避  $1\omega, 2\omega, 3\omega$  激光的 1~4 阶鬼像点, 而且还要避开它们的破坏范围; 2) 打靶透镜的调焦行程要设计得尽量长; 3) 尽量压缩所有光学元件的排布空间, 以降低终端光学组件的体积、重量。据此考虑, 在假设打靶透镜调焦行程可达到  $\pm 20$  mm 情况下, 采用方案 2 对神光 II 升级装置的靶场终端光学组件进行了优化, 得到的鬼像控制设计结果如图 5 所示。

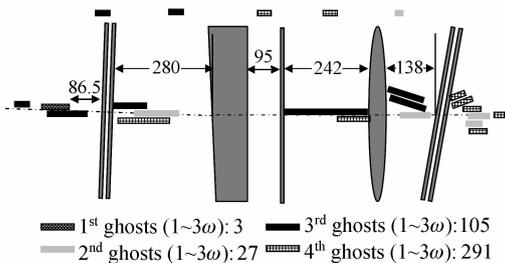


图 5 优化设计后的神光 II 升级装置靶场终端光学组件排布方案的鬼像分布形态图

Fig. 5 Ghost image distribution for the optimum arrangement project of the final optics assembly for SG-II upgrading laser

通过对图 5 进行分析得到: 当透镜调焦行程从  $-20$  mm 变化到  $20$  mm 时, 由终端光学元件产生的鬼像不仅完全占满了终端光学元件间的空挡, 而且还有一部分 3, 4 阶鬼像已经落在光学元件内部; 以及在透镜行程达到  $-20$  mm 时, 三倍频器和 1 阶鬼像间的最短距离为  $86.5$  mm, 不能满足终端光学组件内光学元件基本的排布设计原则, 成了神光 II 装置终端光学组件排布设计的主要限制因素。为了保

证三倍频晶体和其他元件的安全使用, 在牺牲打靶透镜的调焦行程的情况下, 将其从  $\pm 20$  mm 调整为  $\pm 11$  mm, 得到了一个满足各项设计原则的神光 II 升级装置终端光学组件排布方案。具体终端光学组件的结构设计如图 6 所示, 根据各光学元件的位置以及功能将终端光学组件分为三个模块: 倍频器模块, 楔形窗口模块和打靶透镜模块 (包含有 DPP, 打靶透镜, BSG 和防溅射板等光学元件)。

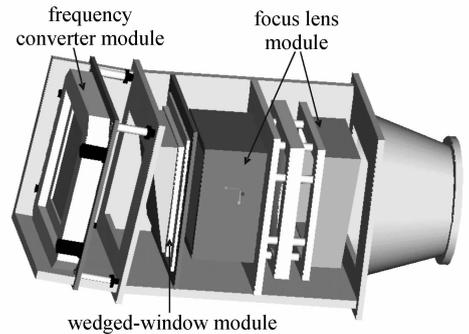


图 6 优化设计好的神光 II 升级装置靶场终端光学组件结构排布图

Fig. 6 Optimum framework of the final optics assembly for SG-II upgrading laser

#### 5 结论

终端光学元件作为高功率激光装置靶场最重要的光学元件组合, 它的设计排布成功与否, 直接关系到 ICF 打靶实验的成功率与稳定性。在神光 II 升级装置靶场空间受限的情况下, 通过采用 Laser designer 和 Lens designer 鬼像分析软件, 避开了所有终端光学元件产生的各阶鬼像, 成功地完成了神光 II 升级装置终端光学组件的优化排布设计, 为我国高功率激光装置靶场终端光学设计又开辟了一条蹊径。

#### 参 考 文 献

- Li Yinzhu, Li Liangyu, Dai Yaping *et al.*. Ghost reflection analysis for the high power laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8):677~680  
李银柱, 李良钰, 戴亚平等. 高功率激光装置中的鬼点反射分析[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8):677~680
- Feng Guoying, Chen Jianguo, Cao Chong *et al.*. Matrix method for locating the off-axial ghost points and lines in high power laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):989~992  
冯国英, 陈建国, 曹冲等. 寻找激光系统中离轴鬼点和鬼线的矩阵方法[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):989~992
- Ma Zairu, Liu Wenbing, Feng Guoying *et al.*. The position formulation of the low-order ghost images in the high power laser system [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(2):55~58  
马再如, 刘文兵, 冯国英等. 高功率激光系统的低阶鬼点位置公式[J]. *激光杂志*, 2003, **24**(2):55~58

- 4 Peng Hansheng. Ultraintense solid-state lasers and applications to the frontiers of sciences [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(7):865~872  
彭翰生. 超强固体激光及其在前沿学科中的应用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7):865~872
- 5 J. L. Hendrix, J. Schweyen, J. Rowe *et al.*. Ghost analysis visualization techniques for complex systems; examples from the NIF final optics assembly [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:306~320
- 6 Zhao Dongfeng, Gu Zhen, Shao Ping *et al.*. Prism based third harmonic splitter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):637~640

- 赵东峰,顾震,邵平等. 基于棱镜实现三倍频谱波分离[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):637~640
- 7 Wade H. Williams, Jerome M. Auerbach, Mark A. Hennesian. Optical propagation modeling for the National Ignition Facility [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:66~70
- 8 Lu Yaxiong, Yang Yapei, Chen Shufen. The Technology of Transmisson and Transform for Laser Beam [M]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1999  
卢亚雄,扬亚培,陈淑芬. 激光束传输与变换技术[M]. 西安:电子科技大学出版社, 1999

· 广告 ·

**FC CASTECH®**

福建福晶科技股份有限公司  
FUJIAN CASTECH CRYSTALS, INC.

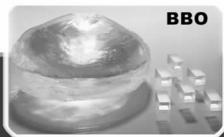
福建福晶科技股份有限公司(CASTECH)简称:福晶公司。主要从事晶体材料及其器件的研发、生产和销售,其产品广泛应用于激光及光通讯领域。公司总部位于福州市区,拥有一幢现代化的8层办公和生产大楼,总面积超过10,000平方米,员工近500人。

经过近二十年的不懈努力,福晶公司成为目前世界上领先的LBO、BBO、Nd:YVO<sub>4</sub>以及Nd:YVO<sub>4</sub>+KTP胶合晶体的生产商。公司的检测技术和设备也处于业界领先地位,拥有Zygo, Nikon, Prism Master等多台检测仪器,与世界上主要的激光公司建立了良好的检测信息交流平台。公司2001年通过ISO9001质量体系的认证。同时公司多年来致力于品牌的建设,在世界上主要工业国家和地区都设有代理或分支机构。公司产品90%以上出口美、日、德等国家和其他美洲、欧洲、亚洲地区,被国际业界誉为中国牌晶体。其中LBO晶体在中国,美国和日本拥有晶体生长和器件应用专利。

福晶公司将本着“团结,奋进,求实,创新”的企业文化精神,朝着“成为非线性光学晶体和激光晶体的最佳全球供应商”的公司目标而努力。



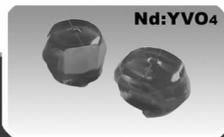
LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>



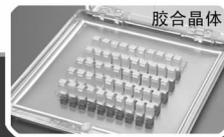
BBO



KTP



Nd:YVO<sub>4</sub>



胶合晶体