

# 分离式终端光学系统的鬼像分析

朱德燕<sup>1\*</sup>, 李平<sup>2</sup>, 彭志涛<sup>2</sup>, 冯斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京航空航天大学航天学院, 江苏 南京 210001;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 分离式终端光学系统(FOA)的光学元件多,输出能量高,鬼像分布复杂,给 FOA 的鬼像分析带来很大的挑战。利用 Zemax 结合自主研发软件 Ghost 对分离式 FOA 的鬼像分布进行优化设计,建立针对真空窗口和屏蔽片的角度及其与聚焦透镜的间距对 FOA 中鬼像分布影响的分析模型,经仿真计算得到两种适合于分离式 FOA 的鬼像分布方案,对比其优缺点,最终确定合理的分离式 FOA 鬼像分布设计方案。

**关键词** 光学设计; 终端光学系统; 分离式; 鬼像分析; 高功率激光装置

中图分类号 O439; O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1101002

## Ghost Analysis of Separated Final Optics Assembly

Zhu Deyan<sup>1\*</sup>, Li Ping<sup>2</sup>, Peng Zhitao<sup>2</sup>, Feng Bin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing, Jiangsu 210001, China;

<sup>2</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** The separated final optics assembly (FOA) with high power has too many optical elements and complicated ghost distribution, which cause difficulty in ghost analysis of FOA. By using the Zemax software and Ghost software designed by ourselves, we analyze the ghost distribution of the FOA, establish the model to analyze the effects of the angle between the vacuum window and debris shield and the distance from the focusing lens to vacuum window or debris shield on the ghost distribution, use the model to analyze two ghost distribution schemes for the separated FOA, contrast the two designs, and get the final ghost distribution of the separated FOA.

**Key words** optical design; final optics assembly; separating; ghost analysis; high-power laser facility

**OCIS codes** 220.4830; 120.4570

## 1 引言

终端光学系统(FOA)是高功率激光装置的核心子系统,由多块透射式光学元件组成,具有谐波转换、谐波分离、测量取样、光束聚焦等重要功能。当高能激光通过 FOA 上的透射式光学元件时,元件的每个表面均具有残余反射,若残余反射光在终端光学元件、元件边框或金属筒壁上的通量过强,会对光学元件造成损伤,从而对终端系统产生污染,降低 FOA 的输出能力。因此,分析终端系统的鬼像并避免鬼像对光学元件的破坏,成为高功率激光装置 FOA 设计的一个重要问题<sup>[1-3]</sup>。

美国国家点火装置(NIF)包含 192 路 FOA,可输出能量为 1.8 MJ(脉宽为 3.5 ns,功率为 500 TW)、波长为 351 nm 的激光,共包含 1344 块光学元件,这些元件呈紧凑式排布,鬼像分布复杂。研究人员于 1994 年完成 NIF 概念设计,1998 年在原型样机 Beamlet 上进行了首次集成验证,暴露出紫外光学元件的大面积损伤;经过修改,2006 年研究人员利用 NIF 开展了 FOA 的第二次集成验证,并于 2007 年完成 NIF 最终定型,但直到 2017 年 5 月,仍有研究发现鬼像导致的终端污染和光学元件损伤<sup>[4-7]</sup>。在国内,神光系列装置 FOA 的设计也经历了集成验证和设计更改的过程。2008 年,研究人员

收稿日期: 2019-05-28; 修回日期: 2019-06-24; 录用日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(61605185,11704352)

\* E-mail: zhedy@aliyun.com

针对神光 II 升级装置鬼像对光学元件的破坏,对 FOA 进行了优化设计<sup>[8-11]</sup>。神光 III 原型装置中杂散光未吸收,导致屏蔽片表面的剩余反射光入射到终端内壁,污染光学元件<sup>[12-13]</sup>。不管是美国 NIF 还是国内神光 III 的原型及其主机装置,FOA 都采用的是紧凑型排布。相对于紧凑型 FOA 来说,分离式 FOA 将光学元件放置在大气环境,拉大了系统内元件的间距,缓解了级联热像的影响,实现了与靶室的真空隔离,成为当前研究工作的重点。分离式 FOA 由于倍频段到聚焦段的距离大,多次互相作用的鬼像相对较小,因此其鬼像分析主要集中在优化真空窗口和屏蔽片的角度及其与聚焦透镜的间距方面<sup>[14-15]</sup>。

针对分离式 FOA,本文通过优化真空窗口和屏蔽片的角度及其与聚焦透镜的间距,计算分析各参数对鬼像分布的影响,提出两种 FOA 的鬼像分析方案,对比分析其优缺点,优化设计出最终的 FOA 方案。

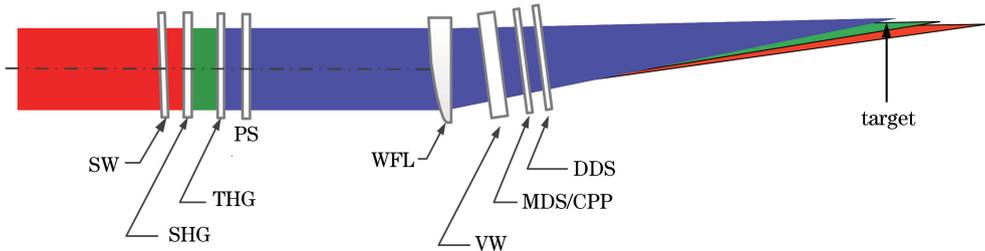


图 1 分离式 FOA 基本示意图  
Fig. 1 Layout of separated FOA

和美国的 NIF 及国内神光系列相比,分离式 FOA 的倍频段和聚焦段之间的距离较大,可有效避免倍频段和透镜段光学元件之间多次反射引入的鬼像。为了便于鬼像的吸收,设计为真空窗口和屏蔽片的一维倾斜角相同,使其产生的一阶鬼

## 2 分离式 FOA 原理

相对于紧凑型 FOA,分离式 FOA 具有两个特点:1)元件工作在大气环境下,实现了与靶室的真空隔离,有利于光学元件的稳定运行和终端光学系统的洁净控制;2)倍频段远离透镜段,可消除互相多次作用引入的鬼像。分离式 FOA 的结构如图 1 所示;终端光学元件沿纵向排布在较长的距离内,8 块光学元件集中放置在倍频段和聚焦段。倍频段靠近传输反射镜,主要实现谐波转换与焦斑控制功能,结构上独立支撑,由隔离窗口 (SW)、二倍频晶体 (SHG)、三倍频晶体 (THG) 和偏振匀滑晶体 (PS) 组成;聚焦段靠近真空靶室,由聚焦透镜 (WFL)、真空窗口 (VW)、主屏蔽片 (MDS) 和次屏蔽片 (DDS) 组成,主要实现光束聚焦、谐波分离、测量取样、真空密封和碎片屏蔽等功能。

像集中在终端的相同位置。但是,这样做的缺点是,由真空窗口和屏蔽片 4 个表面反射回的鬼像位置接近,鬼像通量叠加,产生干涉调制,鬼像更具破坏力。其中,真空窗口前表面反射的一阶鬼像如图 2 所示。

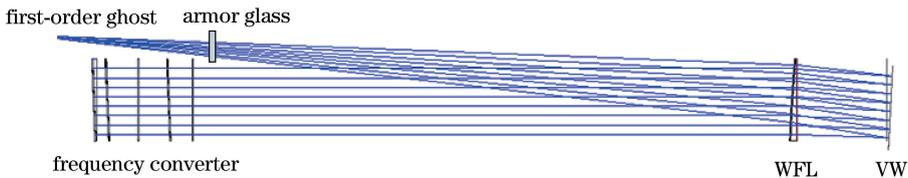


图 2 真空窗口前表面反射一阶鬼像  
Fig. 2 The first-order ghost reflected from vacuum window

对图 2 进行仿真计算可以得到,当透光区上方的鬼像最大光束口径,即吸收玻璃处的光束口径为 10 cm×10 cm 时,吸收玻璃处的通量为

$$F = \frac{E}{S} \times N \times R = \frac{10000}{10 \times 10} \times 4 \times 2\% = 8 \text{ (J/cm}^2\text{)}, \quad (1)$$

式中: $F$  为通量; $E$  为激光系统的输入能量; $S$  为光

斑面积; $N$  为引起鬼像的反射表面的数值; $R$  为每个反射表面的最大反射率。输入能量最高为  $10^4$  J,真空窗口和屏蔽片共有 2 个光学元件,4 个反射面。在装置运行一段时间后,每个元件的透射率降低,反射率提高,考虑最差情况,设每个表面的反射率为 2%。一阶鬼像必须采用吸收玻璃进行吸收处理,否则会将终端的筒壁击穿,但吸收玻璃处的通量高达

8 J/cm<sup>2</sup>, 吸收玻璃同样会被损坏。

### 3 分离式 FOA 的鬼像分析

#### 3.1 分离式 FOA 鬼像模型

为了对分离式 FOA 出现的一阶鬼像通量过高的问题进行优化分析, 建立其一阶鬼像的分析模型。由于真空窗口和屏蔽片返回的一阶鬼像模型一致, 因此

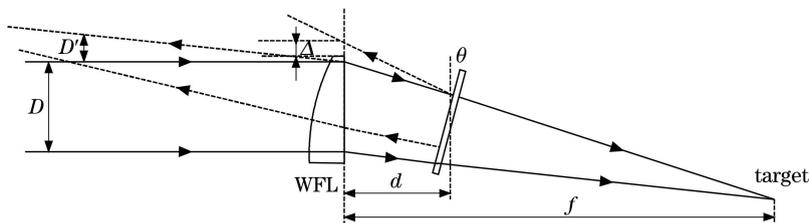


图 3 一阶鬼像分析模型

Fig. 3 Model for the first-order ghost analysis

一阶鬼像在吸收玻璃处的光束口径  $D'$  为

$$D' = \left(1 - \frac{2d}{f}\right)D - \frac{\left[2D + 2\left(1 - \frac{2d}{f}\right)D - 8d\theta\right](f-d)D}{f^2\theta + (f-d)D} \quad (3)$$

元件间距增大时元件本身通量增大, 因此在实际选取过程中  $d$  不宜过大。由(3)式可知: 吸收玻璃尺寸的表达式过于繁琐, 设定元件到聚焦透镜的距离分别为 100, 300, 500, 700, 900 mm, 针对不同倾斜角度得到吸收玻璃处的光束口径(图 4)。

由图 4 可知: 为了增大吸收玻璃处的光束口径并降低吸收玻璃处的光通量, 需要增大光学元件的倾斜角度或增大元件间距。但由(2)式可知: 为了减小一阶鬼像在透镜上的横移量, 需要减小光学元件的倾斜角度或元件间距。

综合考虑, 设计了 2 种方案。方案 1: 为了减小一阶鬼像在透镜上的横移量, 保证一阶反射光不进入透镜边框, 且一阶鬼像吸收玻璃处的通量最小, 将屏蔽片设计成大角度, 屏蔽片反射的一阶鬼像与真空窗口的一阶鬼像分开。方案 2: 不考虑一阶鬼像

可对一阶鬼像分析模型进行简化, 如图 3 所示。

图 3 中, 聚焦透镜焦距为  $f$ , 光束口径为  $D$ , 真空窗口和屏蔽片的倾斜角度为  $\theta$ , 真空窗口或屏蔽片到聚焦透镜的距离为  $d$ , 则一阶鬼像在聚焦透镜上的横移量  $\Delta$  为

$$\Delta = \left(2\theta - \frac{D}{f}\right)d \quad (2)$$

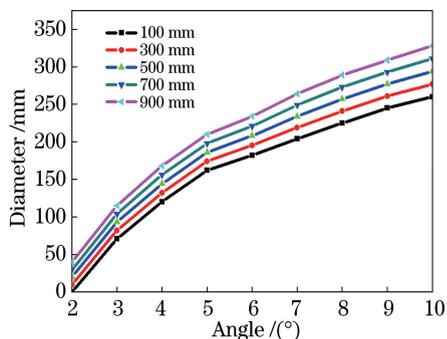


图 4 吸收玻璃光束口径与元件倾斜角度及元件间距的关系  
Fig. 4 Relationship among beam diameter of absorption glass, tilted angle of element, and distance between elements

在聚焦透镜上的横移量, 尽可能满足一阶鬼像吸收玻璃处的通量最小, 且不增大屏蔽片角度, 保证屏蔽片插拔方便。

#### 3.2 方案 1 的分离式 FOA 鬼像分布

基于方案 1 的设计理念得到的优化设计结果为: 真空窗口与透镜的间距  $d_1 = 200$  mm, 屏蔽片与透镜的间距  $d_2 = 800$  mm, 真空窗口的倾斜角度  $\theta_1 = 5.5^\circ$ , 屏蔽片的倾斜角度  $\theta_2 = 20^\circ$ 。

真空窗口返回的一阶鬼像分布情况如图 5 所

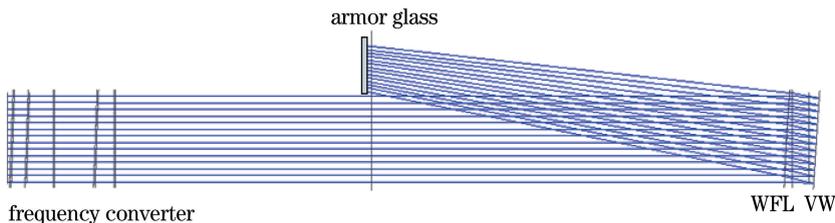


图 5 真空窗口返回的一阶鬼像

Fig. 5 The first-order ghost reflected by vacuum window

示。此时,吸收玻璃的光束口径为  $22\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ , 只有真空窗口一个元件的两个表面发生反射,则吸收玻璃处的光通量为

$$F = \frac{10000}{22 \times 22} \times 2 \times 2\% = 0.83\text{ (J/cm}^2\text{)}。 \quad (4)$$

屏蔽片返回的一阶鬼像如图 6 所示。此时,屏蔽片一阶鬼像在吸收玻璃处的光束口径为  $47\text{ cm} \times 35\text{ cm}$ , 只有屏蔽片一个元件的两个表面发生反射,其通量为

$$F = \frac{10000}{47 \times 35} \times 2 \times 2\% = 0.24\text{ (J/cm}^2\text{)}。 \quad (5)$$

在此基础之上,采用自主研发的软件 Ghost 结合 Zemax 分析整个终端的一阶、二阶、三阶鬼像的焦点分布。经过透镜反射的鬼像不经过倍频段,倍频段无鬼像焦点。屏蔽片反射的一阶鬼像已被吸收

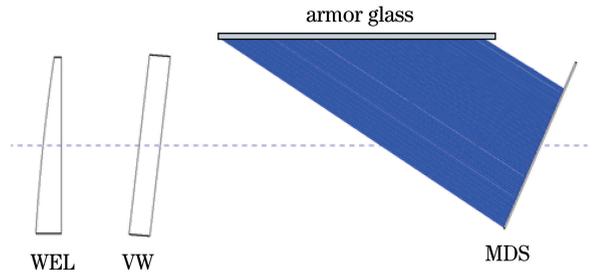


图 6 屏蔽片返回的一阶鬼像

Fig. 6 The first-order ghost reflected by debris shield

玻璃吸收处理,屏蔽片无高阶反射鬼像。因此,只需分析经过真空窗口和透镜反射的会聚高阶鬼像。图 7(a)为经过真空窗口反射再经过透镜反射的二阶鬼像焦点,图 7(b)为经真空窗口反射、透镜反射再经过真空窗口反射的三阶鬼像焦点。

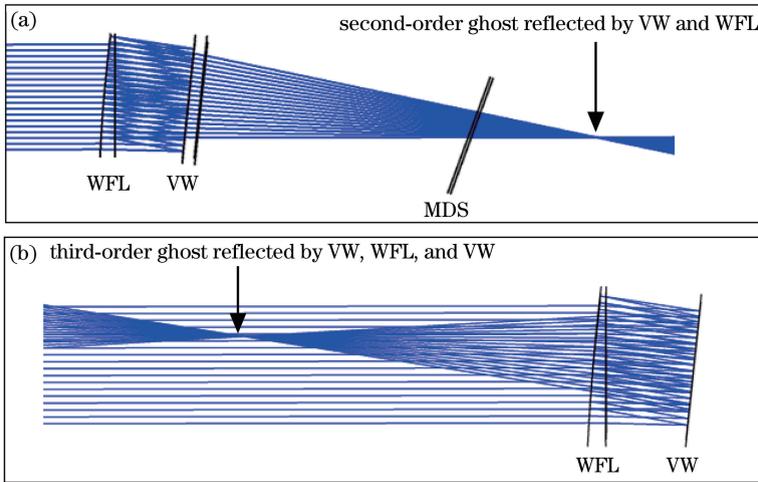


图 7 FOA 的鬼像焦点分布示意图。(a)二阶鬼像;(b)三阶鬼像

Fig. 7 Focus of ghost of FOA. (a) The second-order ghost; (b) the third-order ghost

### 3.3 方案 2 的分离式 FOA 鬼像分布

基于方案 2 的设计理念得到的优化设计结果

为: $d_1=640\text{ mm}, d_2=320\text{ mm}, \theta_1=8^\circ, \theta_2=8^\circ$ 。

此时,真空窗口返回的一阶鬼像如图 8 所示。



图 8 真空窗口返回的一阶鬼像

Fig. 8 The first-order ghost reflected from vacuum window

由于真空窗口和屏蔽片的一维倾斜角度相同,因此吸收玻璃处的光通量增大了 1 倍。为了减小吸收玻璃处的光通量,优化真空窗口和屏蔽片的第二个倾斜维度,使光学元件具有两个维度的倾斜角度。其中,一个维度的倾斜角度一致,保证一阶鬼像偏离主光路的光斑口径较大;另一个维度向相反方向倾

斜,保证光斑完全分开,通量降低了 50%。具体地,若真空窗口另一维度倾斜  $3^\circ$ ,屏蔽片的另一维度倾斜  $-3^\circ$ ,则真空窗口和屏蔽片的一阶鬼像在轴向的相同位置处分开,其光斑分布设计结果如图 9 所示。

图 9 中,左侧光斑为真空窗口返回的一阶鬼像,右侧光斑为屏蔽片返回的一阶鬼像。此时,吸收玻

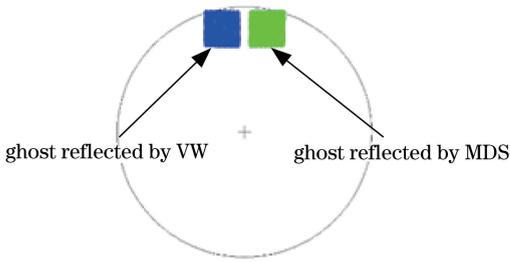


图 9 吸收玻璃处的光斑分离示意图

Fig. 9 Spot separation diagram on absorbed glass

璃处每个光斑的口径为  $28\text{ cm} \times 28\text{ cm}$ , 每个光斑对应一个元件的两个表面反射, 其通量为

$$F = \frac{10000}{28 \times 28} \times 2 \times 2\% = 0.51\text{ (J/cm}^2\text{)}. \quad (6)$$

此时, 透镜上的光束口径为  $38\text{ cm} \times 38\text{ cm}$ , 真空窗口和屏蔽片两个元件的 4 个反射面叠加, 则其通量为

$$F = \frac{10000}{38 \times 38} \times 4 \times 2\% = 0.55\text{ (J/cm}^2\text{)}. \quad (7)$$

在此基础之上, 采用自主研发的软件 Ghost 分析整个终端的一阶、二阶、三阶鬼像的焦点分布。其中: 经过透镜反射的鬼像不经过倍频段, 倍频段无鬼像焦点。真空窗口和屏蔽片反射的鬼像形式一致。因此, 只需分析经过真空窗口和透镜反射的会聚高阶鬼像。图 10(a) 为经过真空窗口反射再经过透镜反射的二阶鬼像焦点, 图 10(b) 为经真空窗口反射、透镜反射再经过真空窗口反射的三阶鬼像焦点。

### 3.4 分离式 FOA 鬼像分布结果对比分析

#### 3.4.1 方案 1

在一阶鬼像方面, 由(4)式和(5)式可知, 吸收玻璃处的通量小于  $1\text{ J/cm}^2$ , 可满足一阶鬼像的分布设计需求。

在二阶鬼像方面, 由图 7(a) 可知, 二阶鬼像焦点离屏蔽片相对较近, 在屏蔽片处的光斑口径为  $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ , 二阶鬼像对 FOA 影响最大的元件为屏蔽片, 二阶鬼像在屏蔽片处的通量为

$$F = \frac{10000}{8 \times 8} \times 2 \times 2\% \times 2\% = 0.13\text{ (J/cm}^2\text{)}. \quad (8)$$

可见二阶鬼像在屏蔽片处的通量由真空窗口的两个表面反射叠加, 其经过了真空窗口反射和透镜反射。由(8)式可知, 二阶鬼像在屏蔽片处的通量小于  $0.5\text{ J/cm}^2$ , 其影响可忽略。

在三阶鬼像方面, 由图 7(b) 可知, 三阶鬼像焦点离聚焦透镜相对较近, 在聚焦透镜处的光斑口径为  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ , 三阶鬼像对 FOA 影响最大的元

件为聚焦透镜, 三阶鬼像在聚焦透镜处的通量为

$$F = \frac{10000}{20 \times 20} \times 2 \times 2\% \times 2\% \times 2 \times 2\% = 0.0008\text{ (J/cm}^2\text{)}. \quad (9)$$

三阶鬼像在聚焦透镜处的通量由真空窗口的两个表面反射叠加, 其依次经过了真空窗口反射、透镜反射后再经真空窗口反射。由(9)式可知, 三阶鬼像在聚焦透镜处的通量远小于  $0.5\text{ J/cm}^2$ , 其影响可忽略。

#### 3.4.2 方案 2

在一阶鬼像方面, 由(6)式和(7)式可知, 吸收玻璃处的通量小于  $1\text{ J/cm}^2$ , 满足一阶鬼像的分布设计需求。

在二阶鬼像方面, 由图 10(a) 可知, 二阶鬼像焦点离屏蔽片相对较近, 在屏蔽片处的光斑口径为  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ , 二阶鬼像对 FOA 影响最大的元件为屏蔽片, 二阶鬼像在屏蔽片处的通量为

$$F = \frac{10000}{10 \times 10} \times 4 \times 2\% \times 2\% = 0.16\text{ (J/cm}^2\text{)}. \quad (10)$$

二阶鬼像在屏蔽片处的通量由真空窗口和屏蔽片的 4 个表面反射叠加, 其经过了真空窗口或屏蔽片反射和透镜反射。由(10)式可知, 二阶鬼像在屏蔽片处的通量小于  $0.5\text{ J/cm}^2$ , 其影响可忽略。

在三阶鬼像方面, 由图 10(b) 可知, 三阶鬼像焦点离聚焦透镜相对较近, 在聚焦透镜处的光斑口径为  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ , 三阶鬼像对 FOA 影响最大的元件为聚焦透镜, 三阶鬼像在聚焦透镜处的通量为

$$F = \frac{10000}{5 \times 5} \times 4 \times 2\% \times 2\% \times 4 \times 2\% = 0.05\text{ (J/cm}^2\text{)}. \quad (11)$$

三阶鬼像在聚焦透镜处的通量由真空窗口和屏蔽片的 4 个表面反射叠加, 其依次经过了真空窗口或屏蔽片反射、透镜反射后再经真空窗口或屏蔽片反射。由(11)式可知, 三阶鬼像在聚焦透镜处的通量远小于  $0.5\text{ J/cm}^2$ , 其影响可忽略。

综合来看, 方案 1 和方案 2 均能满足鬼像的合理分布要求。但方案 1 中, 透镜和真空窗口的间距太小, 透镜损伤产生的溅射可能会导致真空窗口的损伤, 级联效应相对严重。方案 2 中增大的空间简化了热像问题, 元件缺陷造成的光束调制问题在开放式终端中得到了有效简化, 增加的透镜边框上的鬼像可以通过在透镜边框加吸收玻璃进行处理。因此, 方案 2 非常适合于分离式终端的鬼像分布设计。

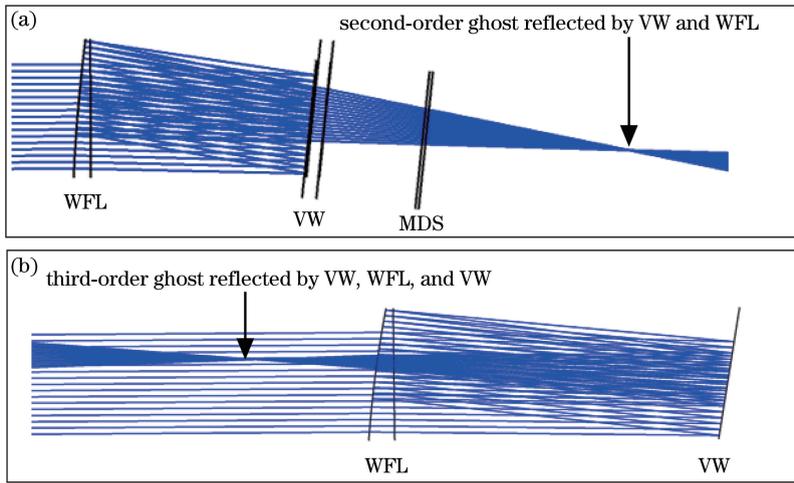


图 10 FOA 鬼像焦点分布示意图。(a)二阶鬼像;(b)三阶鬼像

Fig. 10 Focus of ghost of FOA. (a) The second-order ghost; (b) the third-order ghost

## 4 结 论

FOA 为激光束靶耦合提供末级光束控制,可实现谐波转换、谐波分离、光束聚焦、焦斑控制、测量取样、真空密封、碎片防护等功能,支撑装置高效稳定运行。建立了真空窗口和屏蔽片的角度及其与聚焦透镜的间距对分离式 FOA 中鬼像分布影响的模型,利用该模型进行仿真计算,提出了两种适合于分离式 FOA 的鬼像分布方案,对比分析了两种方案的优缺点,完成了高功率激光装置中分离式 FOA 的鬼像分析,为分离式 FOA 优化设计提供参考。

### 参 考 文 献

[1] Edward English R, Jr, Laumann C W, Miller J L, *et al.* Optical system design of the national ignition facility[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3482: 726-736.

[2] Lawrence Livermore National Laboratory. National ignition facility user guide[Z/OL]. [2019-05-15]. [http://lasers.llnl.gov/for\\_users/pdfs/2012user\\_guide.pdf](http://lasers.llnl.gov/for_users/pdfs/2012user_guide.pdf).

[3] van Wonterghem B M, Burkhart S C, Haynam C A, *et al.* National ignition facility commissioning and performance[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5341: 55-65.

[4] Hunt J S. National ignition facility performance review 1998 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1999.

[5] Bude J, Miller P, Baxamusa S, *et al.* High fluence laser damage precursors and their mitigation in fused silica[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5839-5851.

[6] Keane C J. National ignition facility user guide[R].

Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2014.

[7] Hunt J S. National ignition facility performance review 1999 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2000.

[8] Qiao Z F, Lu X Q, Zhao D F, *et al.* Arrangement design of the final optics assembly for the SG-II upgrading laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(9): 1328-1332.  
乔战峰, 卢兴强, 赵东峰, 等. 神光 II 升级装置终端光学组件的排布设计[J]. 中国激光, 2008, 35(9): 1328-1332.

[9] Zhao D F, Wang L, Lin Z Q, *et al.* Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No.9 system of SG-II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0702001.  
赵东峰, 王利, 林尊琪, 等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0702001.

[10] Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, *et al.* Review on development of shenguang- II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002.  
朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.

[11] Yang A H, Liu D A, Gao Y R, *et al.* Propagation and judgement technique of hot images in high power laser system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0901006.  
杨爱华, 刘德安, 高雅茹, 等. 高功率激光系统中热像的传输及预判技术[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0901006.

[12] Wang J, Zhang X M, Li F Q, *et al.* Risk evaluation of transverse stimulated Raman scattering in large-aperture, high fluence KDP crystal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0502011.

- 王静, 张小民, 李富全, 等. 大口径 KDP 晶体紫外光横向受激拉曼散射风险判据研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502011.
- [13] Zhang X M, Wei X F. Review of new generation of huge-scale high peak power laser facility in China [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100003.
- 张小民, 魏晓峰. 中国新一代巨型高峰值功率激光装置发展回顾 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100003.
- [14] Li F Q, Han W, Wang F, *et al.* Research status of final optics assembly in high-power laser facility [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 060002.
- 李富全, 韩伟, 王芳, 等. 高功率激光驱动器终端光学组件研究现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 060002.
- [15] Moses E I. Ignition on the national ignition facility: a path towards inertial fusion energy [J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(10): 104022.