

屏蔽罩的优化设计与杂散光分析

朱德燕, 彭志涛

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为了解决激光惯性约束聚变系统中屏蔽罩引起的杂散光问题,建立了屏蔽罩的三维蜂窝结构模型,提出了屏蔽罩的杂散光分析方法,分析了屏蔽罩的蜂窝曲率与两蜂窝中心间距对杂散光的影响。结果表明:激光通过屏蔽罩反射,始终存在反射光光强最强区域;不同角度的反射光强度峰值和光反射回原光束的总能量随着屏蔽罩蜂窝直径和蜂窝间距的增大而增大。基于此,在设计屏蔽罩时,应严格控制蜂窝直径与蜂窝间距,使终端光学系统避开反射光最强区域,使得散射光相对均匀地分布到立体空间中。

关键词 几何光学; 屏蔽罩; 杂散光分析; 三维蜂窝结构; 惯性约束聚变

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0101010

Optimized Design and Strayed Light Analysis of Shield

Zhu Deyan, Peng Zhitao

Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract To solve the problem of strayed light introduced by the shield in an inertial confinement fusion system, we establish a three-dimensional honeycomb structural model and propose a strayed light analysis method of shield. We also analyze the influences of the honeycomb curvature and central distance of two honeycombs on the strayed light. The results show that the laser is reflected through the shield, and there is always an area with the highest light intensity of the reflected light. The peak-to-valley of the reflected light intensity and total power of the light back to system increase with the increasing honeycomb diameter and honeycomb spacing of the shield. Based on this, the diameter and spacing of honeycomb should be controlled strictly when we design shield, so that to make the terminal optical system keep away from the area of highest reflected light intensity and let the strayed light distribute evenly in solid space.

Key words geometric optics; shield; strayed light analysis; three-dimensional structure of honeycomb; inertial confinement fusion

OCIS codes 080.2740; 220.3620

1 引 言

在激光惯性约束聚变系统中,驱动源激光脉冲被分成强度完全相同的几束高能激光束,通过终端光学系统中的倍频转换后,三倍频激光从不同方向聚焦到靶丸处,屏蔽罩支撑固定住靶丸,使靶丸受到光束的均匀照射,并使倍频转换剩余的基频光打到屏蔽罩上^[1-6]。对于脉宽为 3 ns、能量为 6000 J 的基频光,屏蔽罩若以高反射效率将其反射到终端光学系统中,则其光通量过大,可能造成终端光学系统中屏蔽片的损伤;或者光束返回到终端光学系统中

的取样光栅上,由取样光栅再反射、衍射至测量系统,给三倍频测量系统引入极大误差,造成三倍频能量测量的不准确;屏蔽罩的反射杂散光的反向传输过程会经过聚焦透镜,其焦点位置不可预期,可能给终端光学系统中的倍频段引入新的焦点,造成倍频段光学元件的损伤,影响激光装置的正常运行,导致巨大的危害与经济损失^[5-9]。

对于平板型屏蔽罩,基频光的反射光遵循反射定律,沿反射角方向反射出去,直接进入另一个激光束组中,损坏终端光学元件,给三倍频测量系统引入误差。为了避免基频反射光沿某一个入射激光的角度

收稿日期: 2017-08-03; 收到修改稿日期: 2017-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(61377102, 61605185)、国防基础科研计划(B1520133010)

作者简介: 朱德燕(1990—),女,助研,主要从事光学设计及检测方面的研究。E-mail: zhedy@aliyun.com

反射,美国劳伦斯立弗莫尔国家实验室在靶室中采用吸收处理的方法,将基频光均匀反射到靶室的立体空间中,避免其以高反射效率反射到终端光学系统中,另外,他们于2012年提出将屏蔽罩表面从平板结构改为蜂窝结构^[2]。蜂窝结构是在原来平板结构的基础上,在8.5 mm宽、48.55 mm长的屏蔽罩尺度范围内均匀排列的、直径为5 mm、孔中心间隔为2.5 mm的三维孔状结构^[10-13]。三维蜂窝结构的采用有效改善了原来平板结构导致的某一个立体角光强过大的问题,使得基频光通过三维蜂窝孔结构散射,相对均匀地散射到整个立体空间中^[12-14]。目前国内激光驱动器系统的屏蔽罩也主要采用蜂窝结构,蜂窝结构已成为当前屏蔽罩的主要结构。但关于三维蜂窝结构模型的建立、蜂窝结构导致的空间杂散光分布和强度的情况以及蜂窝结构的参数优化设计等方面的工作,一直尚未开展。

本文首先建立了屏蔽罩的三维蜂窝结构模型以及屏蔽罩的杂散光分析模型,通过光源、屏蔽罩、探测器的设计,完成了屏蔽罩杂散光的设计,并分析了屏蔽罩单一蜂窝直径与两蜂窝中心间距对立体空间杂散光分布的影响,以及对返回原光路光束光强的影响,得出屏蔽罩三维蜂窝结构的优化设计方法。

2 屏蔽罩杂散光分析模型

屏蔽罩总长为 L ,其三维结构如图1所示。图1(a)为屏蔽罩的俯视图,图1(b)为屏蔽罩的右视图。在屏蔽罩平板上,等间隔地掏出一系列相同尺寸的小圆孔。对于屏蔽罩上的每个蜂窝结构,其三维结构示意图如图2所示。蜂窝直径为 D ,相邻蜂窝中心间距为 d ,则蜂窝结构等效于从一个边长为 d 的立方

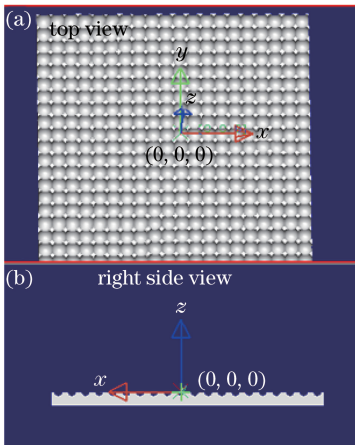


图1 屏蔽罩结构。(a)俯视图;(b)右视图
Fig. 1 Structure of shield. (a) Top view;
(b) right side view

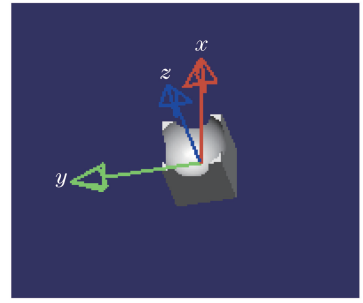


图2 蜂窝结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of honeycomb

体上面挖出一个直径为 D 的半球。

建立三倍频激光、基频光与屏蔽罩坐标系。从终端光学系统中发射出的三倍频激光聚焦到靶点,为了在实际设计中更方便地分析多路激光打靶的情况,以三倍频激光焦点为坐标原点,其焦距为 f_3 ,三倍频激光与 z 轴的夹角为 θ_3 ,从终端光学系统中射出的基频光焦距为 f_0 ,基频光与 z 轴的夹角为 θ_0 ,光源的口径为 φ 。以其中一路为例,三倍频激光、基频光与屏蔽罩的相对位置如图3所示。

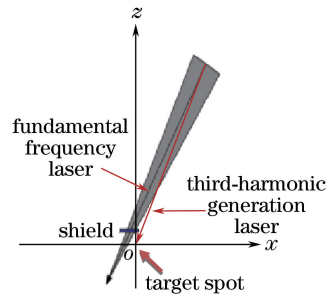


图3 屏蔽罩、基频光与三倍频激光的相对位置

Fig. 3 Relative position of shield, fundamental frequency laser and third-harmonic generation laser

若屏蔽罩表面与三倍频激光焦点的间距为 h ,基频光焦点与三倍频激光焦点的间距为 l ,则

$$l = \sqrt{f_0^2 + f_3^2 - 2f_0f_3 \cos(\theta_0 - \theta_3)}. \quad (1)$$

基频光焦点坐标 $(x_{f_0}, y_{f_0}, z_{f_0})$ 为

$$\begin{cases} x_{f_0} = -l \sin \left[\theta_0 + \arccos \left(\frac{f_0^2 + l^2 - f_3^2}{2f_0l} \right) \right] \\ y_{f_0} = 0 \\ z_{f_0} = -l \sin \left[\theta_0 + \arccos \left(\frac{f_0^2 + l^2 - f_3^2}{2f_0l} \right) \right] \end{cases}. \quad (2)$$

由图1可知,屏蔽罩由多个小蜂窝结构组成,单一蜂窝结构中心的坐标为

$$\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \\ z_0 = h - D/2 \end{cases}, \quad (3)$$

则各蜂窝坐标 (x_n, y_n, z_n) 为

$$\begin{cases} x_n = nd \\ y_n = nd \\ z_n = h - D/2 \end{cases}, \quad -\frac{L}{d} \leq n \leq \frac{L}{d}. \quad (4)$$

基频光的光源中心坐标 (x_s, y_s, z_s) 为

$$\begin{cases} x_s = f_3 \sin \theta_3 \\ y_s = 0 \\ z_s = f_3 \cos \theta_3 \end{cases}. \quad (5)$$

三倍频激光焦点处为靶点,基频光会聚到屏蔽罩表面,并反射到立体空间中,仅当按照原光路角度返回时,反射光才能进入终端光学系统中。在进行屏蔽罩的设计与杂散光分析时,需要创建基频光会聚光源,根据屏蔽罩三维蜂窝模型设计结构,再根据实际杂散光分析需求,设计出接收面。由于光源到屏蔽罩距离远大于蜂窝直径,为了在设计时合理显示设计模型,需要将光源进行等比压缩,若压缩比为 $1:N$,则此时光源中心坐标为

$$\begin{cases} x_{sN} = f_3 \sin \theta_3 / N \\ y_{sN} = 0 \\ z_{sN} = f_3 \cos \theta_3 / N \end{cases}. \quad (6)$$

光源的尺寸 φ_N 为

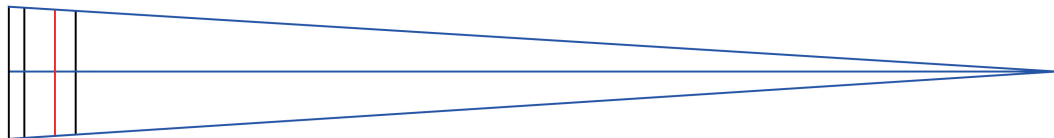


图 4 理想透镜组获得的会聚光源

Fig. 4 Convergent light source produced by ideal lens group

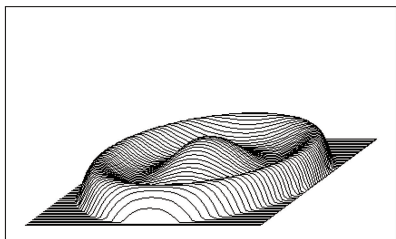


图 5 理想透镜组设计残差

Fig. 5 Design residual error of ideal lens group

该透镜组设计残差的均方根值为 0.25312 nm ,满足设计需求。根据光源坐标与光源尺寸,再结合理想透镜组(理想透镜组中心坐标与光源中心坐标均处于三倍频激光光轴上),得到会聚光源的设计示意图如图 6 所示。因此,可以通过在平面光源后增加理想透镜组的形式,创建出所需的会聚光源。

3.2 探测器设计

在进行杂散光分析时,需分析散射光在 2π 立体

$$\varphi_N = \varphi / N. \quad (7)$$

采用探测器进行探测时,若辐射能中的光通量为 ϕ ,则单位面积上所接收到的光通量即为光照射度 E ,可表示为

$$E = d\phi / dS, \quad (8)$$

式中 S 为接收面积。

3 屏蔽罩设计与杂散光分析

某一激光束组的参数为: $f_0 = 4000 \text{ mm}$, $f_3 = 3800 \text{ mm}$, $\theta_0 = 28.2^\circ$, $\theta_3 = 28.5^\circ$, $D = 1 \text{ mm}$, $d = 0.875 \text{ mm}$, $h = 8 \text{ mm}$ 。根据激光束组的参数设计出光源、理想透镜组和探测器,然后在系统中加入蜂窝结构,分析其杂散光。

3.1 会聚光源设计

首先,选取一个立方体光源,设置该立方体光源的 5 面均不发光,只有 1 面发光,且立方体光源发光面的方向与基频光方向一致。利用 Zemax 进行光学设计,设计出理想透镜组,使单一面发出的光源经过理想透镜组变成会聚光源,其会聚焦距与主激光焦距大小相等。设计结果如图 4 所示,设计残差如图 5 所示。

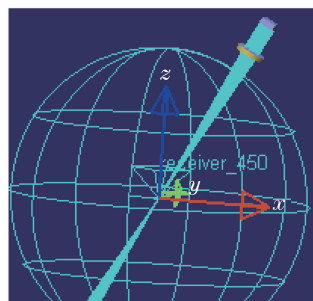


图 6 会聚光源示意图

Fig. 6 Diagram of convergent light source

角内的光强最强区域。考虑该光强最强区域在激光系统中的位置,还要分析出通过屏蔽罩散射回原光路的光强与入射光强的比值。因此,在设计探测器时,需要设计两个探测器,其设计示意图如图 7 所示。

图 7 中球形探测器是为了探测散射光在 2π 立体角内的光强最强区域,由于入射到屏蔽罩的光也

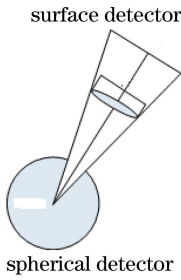


图 7 探测器示意图

Fig. 7 Diagram of detector

会进入球型探测器,因此,在设计球型探测器时,需要使探测器只探测从探测器内部往外发出的光线。面探测器则利用重点采样,只接收按照原光路返回到面探测器的光强,以此光强与入射光强对比,获得散射回原光路的光强与入射光强的比值。

3.3 屏蔽罩设计与杂散光分析

完成光源和探测器的设计后,设计屏蔽罩。首

先,设计出一个边长为 d 的立方体,立方体可以对光进行全反射,再在立方体上挖出一个直径为 D 的半球,挖出半球的底点坐标为蜂窝结构的中心坐标,半球也可以对光进行全反射,其光路结构如图 8 所示。

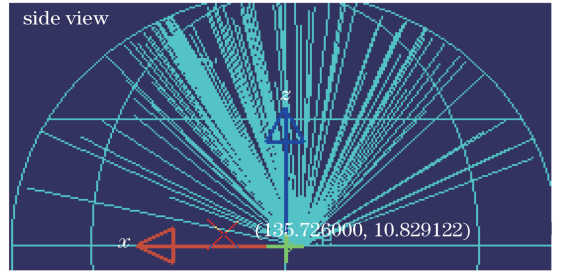


图 8 屏蔽罩杂散光分析光路图

Fig. 8 Optical path of strayed light analysis of shield

将入射光总能量值设置为 1 W ,则可以得到其立体角内光束的发光强度如图 9(a)所示,原路返回光的光照度分布如图 9(b)所示。

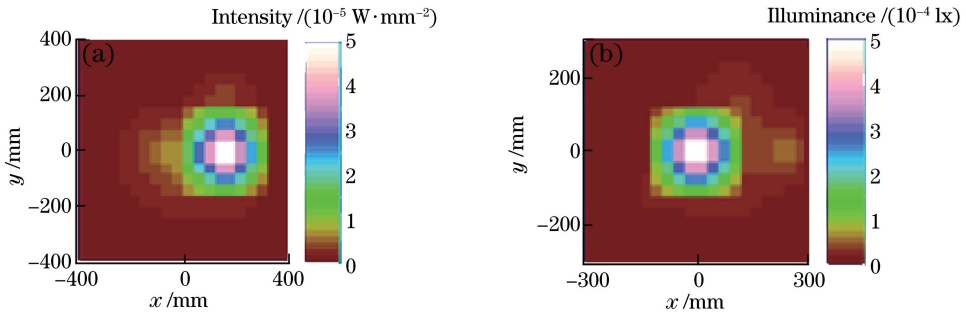


图 9 杂散光分析结果。(a)立体角内的发光强度;(b)原路返回的光照度分布

Fig. 9 Analysis results of strayed light. (a) Intensity distribution of light in solid angle; (b) illuminance distribution of returned light

由图 9 可知,基频光通过蜂窝结构屏蔽罩后,散射光存在一个光强最强区域,其发光强度为 $4 \times 10^{-5}\text{ W}/\text{mm}^2$,且有部分散射光会原路返回到终端光学系统中。将图 9 中的数据导出,结合(10)式和图 9,采用 Matlab 积分得到散射回原光路中的光功率为 $5 \times 10^{-4}\text{ W}$ 。

径设为 $0.6, 0.8, 1.2, 1.4\text{ mm}$,可以得到如图 10~13 所示的分析结果。由图可以看出,4 种情况下散射光都存在一个光强最强区域。将各图中的数据导出,与(10)式相结合,采用 Matlab 积分得到散射回原光路中的光功率分别为 $1 \times 10^{-4}, 7 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-4}, 12 \times 10^{-4}\text{ W}$ 。

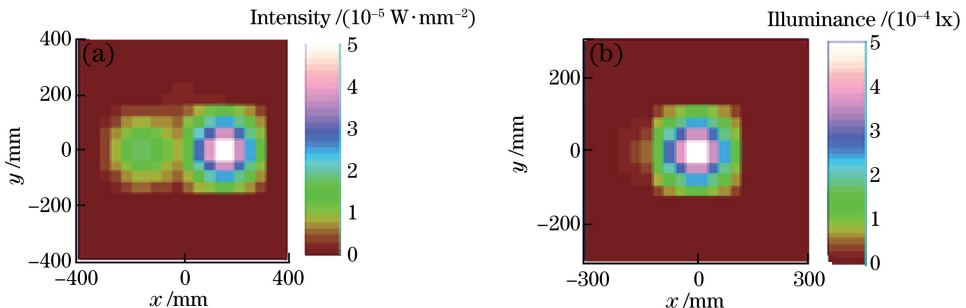


图 10 $D=0.6\text{ mm}$ 时的杂散光分析结果。(a)立体角内的发光强度;(b)原路返回的光照度分布

Fig. 10 Analysis results of strayed light when $D=0.6\text{ mm}$. (a) Intensity distribution of light in solid angle; (b) illuminance distribution of returned light

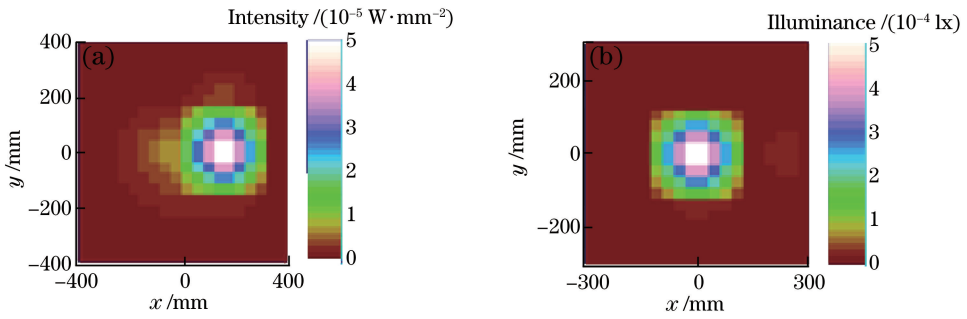


图 11 $D=0.8 \text{ mm}$ 时的杂散光分析结果。(a)立体角内的发光强度;(b)原路返回的光照度分布

Fig. 11 Analysis results of strayed light when $D=0.8 \text{ mm}$. (a) Intensity distribution of light in solid angle; (b) illuminance distribution of returned light

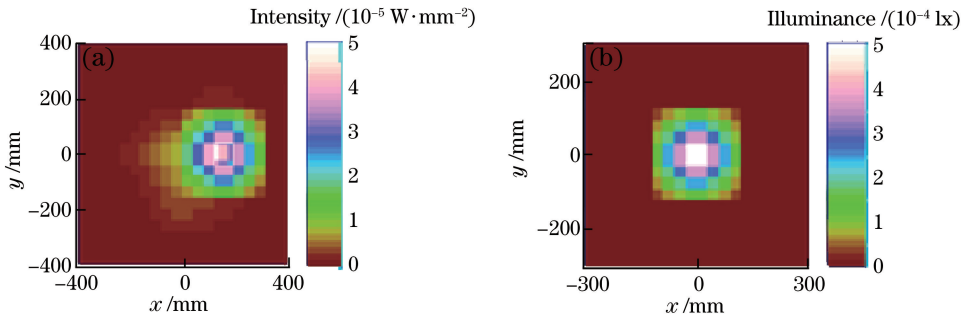


图 12 $D=1.2 \text{ mm}$ 时的杂散光分析结果。(a)立体角内的发光强度;(b)原路返回的光照度分布

Fig. 12 Analysis results of strayed light when $D=1.2 \text{ mm}$. (a) Intensity distribution of light in solid angle; (b) illuminance distribution of returned light

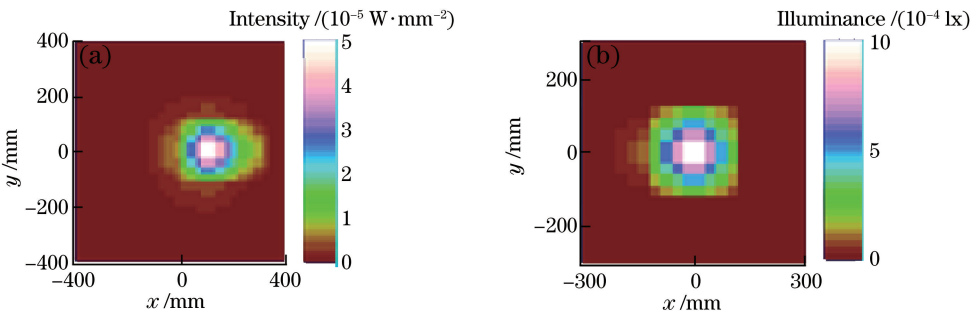


图 13 $D=1.4 \text{ mm}$ 时的杂散光分析结果。(a)立体角内的发光强度;(b)原路返回的光照度分布

Fig. 13 Analysis result of strayed light when $D=1.4 \text{ mm}$. (a) Intensity distribution of light in solid angle; (b) illuminance distribution of returned light

综合图 9~13 可以得到如图 14 所示的结果。可以看出,蜂窝直径增大导致光发散峰谷(PV)值和光反射回原光束的总能量增大,其中前者增大不明显,后者增大情况比较明显。因此,在设计屏蔽罩时,应考虑将蜂窝直径缩小,从而使散射光均匀地散射到立体空间中。

同理,分析当蜂窝直径为 1 mm、相邻蜂窝间距为 0.875,1.730,3.400,6.800,13.400 mm 时,其立体角光束 PV 值和原路返回光强与蜂窝间距的关系如图 15 所示。可以看出,蜂窝间距增大导致光发散 PV 值和光反射回原光束的总能量增大,两者的增

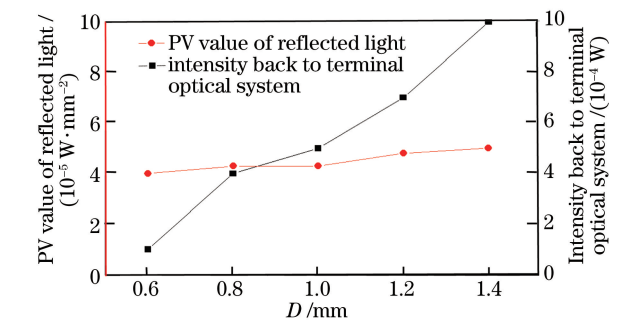


图 14 探测器接收结果与蜂窝直径的关系

Fig. 14 Relationship between results received by detector and diameter of honeycomb

大效果都比较明显。因此,在设计屏蔽罩时,应考虑将相邻蜂窝间距缩小,使得散射光均匀地散射到立体空间中。

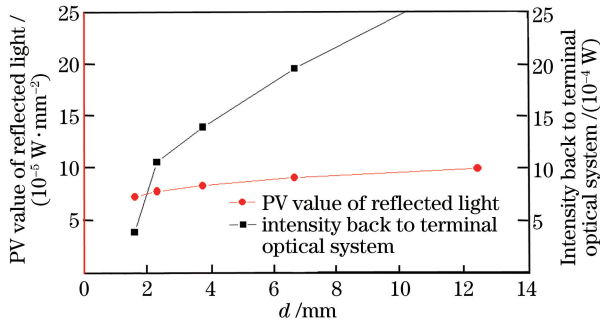


图 15 探测器的接收结果与蜂窝间距的关系

Fig. 15 Relationship between results received by detector and spacing of honeycomb

4 结 论

建立了屏蔽罩的三维蜂窝结构模型,提出了屏蔽罩杂散光的分析方法,分析了屏蔽罩单一蜂窝曲率与相邻蜂窝间距对杂散光的影响。结果表明:激光通过屏蔽罩的反射后,始终存在反射光光强最强区域;屏蔽罩蜂窝直径增大,导致不同角度的反射光强度 PV 值增大,光反射回原光束的总能量增大;屏蔽罩蜂窝间距增大,不同角度的反射光强度 PV 值增大,光反射回原光束的总能量增大。基于此,在设计屏蔽罩时,应严格控制蜂窝直径与蜂窝间距,使蜂窝结构避开反射光最强区域,使得散射光均匀地散射到立体空间中。以上分析结果可以对屏蔽罩蜂窝结构的设计及分析提供一定的指导,能有效减小返回到终端光学系统中的反射光强度。

参 考 文 献

[1] Mose E I. Ignition on the National Ignition Facility: A path towards inertial fusion energy[J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(10): 486-496.

[2] Lawrence Livermore National Laboratory. National Ignition Facility user guide[EB/OL]. [2016-06-30]. http://lasers.llnl.gov/for_users/pdfs/2012user_guide.pdf.

[3] Moreno K A, Chen K C, Crippen J W, et al. Evolution of the capsule fill tube assembly production methods for the National Ignition Campaign [J]. Fusion Science and Technology, 2011, 59(1): 46-50.

[4] Johal Z Z, Crippen J W, Forsman A C, et al. Robust capsule and fill tube assemblies for the

national ignition campaign [J]. Fusion Science and Technology, 2009, 55(3): 331-336.

[5] English R E, Laumann C W, Miller J L, et al. Optical system design of the National Ignition Facility [C]. SPIE, 1998, 3482: 321971.

[6] You K W, Zhang Y L, Zhang X J, et al. Analysis of near-field modulations caused by defects in high power laser system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 43(3): 0302002.
尤科伟, 张艳丽, 张雪洁, 等. 高功率激光系统中缺陷引起的近场调制分析[J]. 中国激光, 2017, 43(3): 0302002.

[7] Shin S J, Kucheyev S O, Orme C A, et al. Xenon doping of glow discharge polymer by ion implantation [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(9): 096101.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Youngblood K, Alford C, Bhandarkar S, et al. Improving the reproducibility of the radial argon concentration in beryllium shells[J]. Fusion Science and Technology, 2011, 59(1): 126-132.

[11] Huang H, Stephens R B, Gibson J B, et al. 3D surface reconstruction of ICF shells after full surface sphere mapping[J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49(4): 642-645.

[12] Huang H, Koziolowski B J, Stephens R B, et al. Quantitative radiography: Submicron dimension calibration for ICF ablator shell characterization[J]. Fusion Science and Technology, 2007, 51(4): 519-524.

[13] Huang H, Nikroo A, Stephens R B, et al. Element specific dopant profiling for ICF ablator capsules with mixed dopant and impurities[J]. Fusion Science and Technology, 2009, 55(4): 356-366.

[14] Eddinger S A, Stephens R B, Huang H, et al. Precision X-ray optical depth measurements in ICF shells[J]. Fusion Science Technology, 2007, 51(4): 525-529.