

文章编号 1004-924X(2009)01-0038-07

# 正交光楔列阵光学系统的小尺度不均匀性

郑建洲<sup>1,2</sup>, 于清旭<sup>1</sup>, 关寿华<sup>1,2</sup>

(1. 大连理工大学 应用物理与光电技术学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连民族学院 理学院, 辽宁 大连 116600)

**摘要:** 推导出了正交光楔列阵(CSWA)聚焦系统的多光束干涉条纹主极大和两相邻主极大间的次极大间距公式, 并根据广义惠更斯-菲涅耳衍射积分理论, 通过数值计算证明了 CSWA 的小尺度不均匀性的变化规律与物理光学的公式符合。另外, 提出改善小尺度不均匀性的两种方法: 楔角偏差和离焦打靶技术。计算分析和实验研究表明, 优化楔角偏差和离焦量的量值, 即  $\delta_{\theta_j} = 2.0\%$ ,  $\Delta Z = 2 \text{ mm}$  时, 干涉主极大间隔与没加这两种技术时相比减小了 6 倍, 小尺度的不均匀性得到了明显的改善。

**关键词:** 激光技术; 小尺度不均匀性; 正交光楔列阵; 楔角偏差; 离焦打靶

**中图分类号:** O436.1 **文献标识码:** A

## Small-scale non-uniformity of cross segmented wedge array focus system

ZHENG Jian-zhou<sup>1,2</sup>, YU Qing-xu<sup>1</sup>, GUAN Shou-hua<sup>1,2</sup>

(1. *School of Physics and Optoelectronic Technology,*  
*Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;*

2. *School of Science, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China*)

**Abstract:** The Separation of Interference Fringes of the Main Diffraction Maxima (SIFMDM) and the second maximum for Cross Segmented Wedge Array (CSWA) focus system were derived, and the change rules of the Small-scale Irradiation Non-uniformity(SSINU) were confirmed by numerical calculations based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral theory. The two methods of reducing the SSINU, the Deviation of Wedge Angles (DWA) and the Off-focal Laser Radiation on the Target (OFLRT), were proposed. Theoretical study and experimental results show they agree quite well. By both the DWA and the OFLRT, the SIFMDM can be reduced by 6 times and the SSINU is also improved obviously, when the DWAS and off-focal variables are optimized to  $\delta_{\theta_j} = 20\%$ ,  $\Delta Z = 2 \text{ mm}$ .

**Key words:** laser technology; small-scale non-uniformity; cross segmented wedge array (CSWA); deviation of wedge angle; off-focus radiation

## 1 引言

在强激光的一些实际聚焦实验和应用中,例如 X 射线激光产生、激光等离子体相互作用和惯性约束核聚变等实验中,对靶面光强分布均匀程度的提高,是非常重要的关键技术。如今已有多种束匀滑技术可使靶面上辐照的大尺度和小尺度的不均匀性大大降低<sup>[1-6]</sup>,列阵式光学系统就是其中一类重要的技术,例如,透镜列阵(LA)<sup>[1-2]</sup>,柱透镜列阵(CLA)<sup>[4]</sup>,光楔列阵(SWA)<sup>[3]</sup>和正交光楔列阵(CSWA)<sup>[5-6]</sup>和焦斑可调的透镜列阵均匀辐照光学系统<sup>[7]</sup>。利用列阵光学系统实现均匀辐照的基本思路是,由列阵将入射激光分割成若干个子束,然后,让这些子束在靶面上重叠起来。光束的分割和子束的叠加消除了入射激光光强分布不均匀性的影响,实现了对靶面的均匀辐照。然而,由于列阵光学系统对入射光场进行了分割,各子孔径出射的光波之间在焦面产生干涉,形成干涉尖峰,引起小尺度范围的光强不均匀,这对靶面辐照均匀性是不利的。为了能够更有效地发挥列阵光学系统在实现靶面均匀辐照中的作用,有必要对正交光楔列阵光学系统小尺度不均匀性的变化规律和减小不均匀的方法进行研究。本文应用波动光学推导出了 CSWA 系统的多光束干涉主极大和次极大间距公式,并通过衍射积分理论数值计算证明了以上公式。用离焦打靶和楔角偏差等方法可以有效地改善 CSWA 系统的大尺度辐照均匀性<sup>[7]</sup>,本文通过理论和实验研究发现,对正交光楔列阵系统用楔角偏差和离焦打靶技术还可以方便有效地改善小尺度不均匀性,进行了详细的计算分析和实验研究,理论和实验符合的很好。最后,给出了主要结论并对相关的问题作了讨论。

## 2 列阵聚焦系统和理论分析

正交光楔列阵原理如图 1 所示,其中 SWA<sub>1</sub>,SWA<sub>2</sub> 为相互正交的两组光楔列阵, $L$  是焦距为  $f$  的非球面透镜。 $S_1$ , $S_2$  分别是 SWA<sub>1</sub> 和 SWA<sub>2</sub> 和非球面透镜  $F$  之间的距离。SWA<sub>1</sub> 和 SWA<sub>2</sub> 具有相同的单元宽度  $d$  和单元数  $N$ ,SWA<sub>1</sub> 和 SWA<sub>2</sub> 的透镜列阵的孔径为  $D$ ,

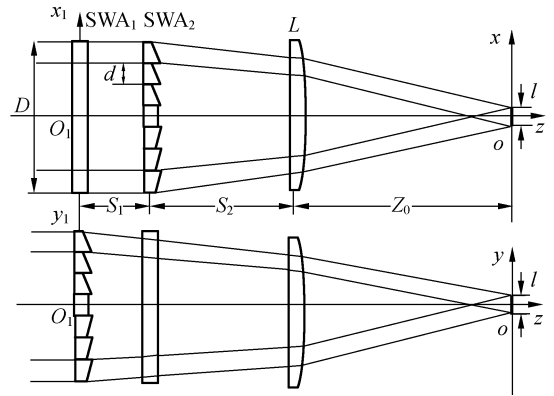


图 1 正交光楔列阵光学系统原理图

Fig. 1 Schematic illustration of cross SWA optical system

则:

$$N = \frac{D}{d}, \quad (1)$$

SWA<sub>1</sub>,SWA<sub>2</sub> 第  $m$ 、 $n$  单元的楔角定义为<sup>[5]</sup>:

$$\alpha_{m_1} = \frac{1}{n-1} \arctan\left(\frac{x_m}{L_1}\right), \quad (2a)$$

$$\alpha_{n_2} = \frac{1}{n-1} \arctan\left(\frac{y_n}{L_2}\right), \quad (2b)$$

其中, $x_m$ , $y_n$  分别表示在  $x$  和  $y$  方向第  $m$ 、 $n$  单元光楔中心到光轴间的距离。 $L_1$ , $L_2$  分别为 SWA<sub>1</sub>,SWA<sub>2</sub> 的重叠距离, $n$  为材料的折射率。

根据几何光学和波动光学可导出 SWA 系统焦斑的位置,即焦斑到非球面透镜  $F$  的间距  $Z_0$  和焦斑宽度  $l$ <sup>[5]</sup>:

$$Z_0 = \frac{L_1 - S_1 - S_2}{1 + (L_1 - S_1 - S_2)/f} \quad (0 \leq S_1 + S_2 \leq L_1), \quad (3)$$

$$l = \frac{d}{1 + (L_1 - S_1 - S_2)/f} \quad (0 \leq S_1 + S_2 \leq L_1), \quad (4)$$

各子束在  $x$ , $y$  靶面上重叠条件为:

$$L_1 = L_2 + S_1, \quad (5)$$

根据波动光学可导出正交 SWA 系统的  $x$  和  $y$  方向的多光束干涉主极大的距离和应各单元的多光束干涉主极大间的次极大的间距分别为:

$$\Delta x_{m,m'} = \frac{\lambda L_1}{2md \left(1 + \frac{L_2 - S_1 - S_2}{f}\right)}, \quad (6a)$$

$$\Delta y_{n,n'} = \frac{\lambda L_2}{2nd \left(1 + \frac{L_2 - S_2}{f}\right)}, \quad (6b)$$

其中, $\lambda$  为激光波长。 $N=7$ , $m$ , $n$  分别取 1 时,得

到主极大条纹的间距,当  $m, n$  分别取 2, 3 时则分别得到次极大的间距。由公式(6)知,正交 SWA 系统的多光束干涉主极大间的距离  $\Delta x$  和  $\Delta y$  通常不相等。但是当  $L_2 \gg f - S_1 - S_2$  时,  $\Delta x \approx \Delta y \approx \lambda f/d$ 。即  $\Delta x$  和  $\Delta y$  比透镜列阵多光束干涉条纹的间距  $\Delta x$  要小,而次极大的间距要比多光束干涉主极大间的间距小  $2m$  和  $2n$  倍,这对提高小尺度的均匀性极为有利。另外,干涉主极大和次极大的间距可以随  $S_1$  和  $S_2$  和  $f$ , 的改变而变化。在实验中,可以方便地改变  $S_1$ 、 $S_2$  和  $f$ , 而其它各参数保持不变而改变  $\Delta x$  和  $\Delta y$ 。

比较透镜列阵  $x$  方向的多光束干涉主极大的距离<sup>[1]</sup>:

$$\Delta x = \frac{\lambda f}{d} \quad (7)$$

由此可看出,  $\Delta x$  仅仅随  $d$  和  $\lambda$  的变化而变化,这是 SWA 系统比透镜列阵系统 LA 具有的优越性之一。

### 3 小尺度不均匀性减小的有效方法

减小干涉条纹间隔是减小列阵光学系统小尺度不均匀性的有效途径。减小干涉条纹间距,使之引向更高空间频率分量的方法除优化设计外,可以利用 SWA 的楔角偏差和离焦打靶来进一步改善系统的小尺度不均匀性。

#### 3.1 楔角偏差

利用加工光楔透镜时有意地留下楔角偏差使各单元的衍射包络彼此相互稍微错开<sup>[8]</sup>, 在有效地抑制单元衍射效应引起的大尺度不均匀性的同时,也使各主极大之间的次极大可增长到与主极大相当的强度,相当于增加了条纹的密度,即减小了干涉条纹间隔,改善了系统的小尺度不均匀性。

在加工时有意留下相对偏差:

$$\delta_{pj} = \left| \frac{\Delta \alpha_{pj}}{\alpha_{pj}} \right|, (pj = m_1, n_2), \quad (8)$$

则实际楔角为:

$$\alpha_{pj}' = \alpha_{pj} (1 \pm \delta_{pj}) \quad (9)$$

#### 3.2 离焦打靶

将靶面放置适当的离焦位置上,使各单元衍射分布不完全重叠,彼此稍微错开<sup>[7]</sup>, 在有效地抑制单元衍射效应引起的大尺度不均匀性的同时,也使条纹各主极大之间的次极大可增长到与主极

大相当的强度,减小了干涉条纹间隔不均匀性,改善了系统的小尺度不均匀性。计算离焦时在系统焦斑的位置要加上一小的改变量  $\Delta Z$ , 这里  $\Delta Z$  是离焦量,即靶面离开最佳重叠位置的距离。

根据衍射积分理论<sup>[6]</sup>, 图 2、图 3 分别给出了 LA 和 SWA 的一维聚焦系统数值计算结果。

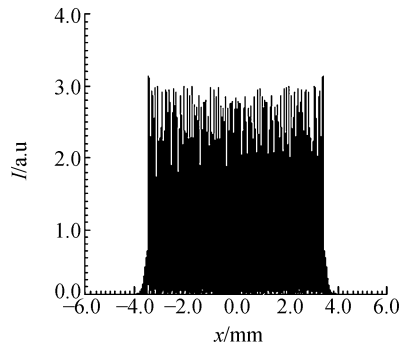


图 2 LA 光学系统焦斑上  $x$  方向的光强分布衍射积分示例

Fig. 2 Intensity distribution along the  $x$  direction of LA focus system calculated by diffraction integral

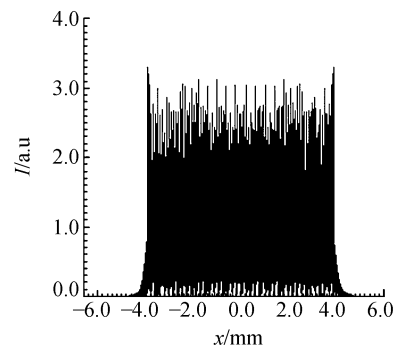


图 3 正交 SWA 光学系统焦斑上  $x$  方向的光强分布衍射积分示例

Fig. 3 Intensity distribution along the  $x$  direction of cross SWA focus system calculated by diffraction integral

LA 的计算参数:透镜列阵单元数  $N=7$ , 单元宽度  $d=D/N=15$  mm, 透镜列阵的焦距  $f_a=1150$  mm, 主聚焦透镜焦距  $f=600$  mm, 入射光波为平面波, 波长为  $\lambda=0.6328$   $\mu\text{m}$ ; SWA 的计算参数:  $N=7, d=D/N=15$  mm,  $L_1=570$  mm,  $L_2=520$  mm;  $S_1=50$  mm,  $S_2=120$  mm, 非球面透镜距  $f=600$  mm; 楔角偏差  $\delta_{pj}=0$ , 离焦量  $\Delta Z=0$  mm; 假设入射光波为平面波, 波长为  $\lambda=$

0.632 8  $\mu\text{m}$ , SWA 材料的折射率  $n=1.516$ .

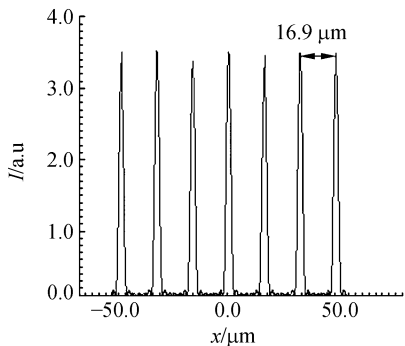


图 4 LA 光学系统焦斑上  $x$  方向的焦斑中心处干涉条纹放大后的结果

Fig. 4 Amplified interference speckles at the centre for the Fig. 2

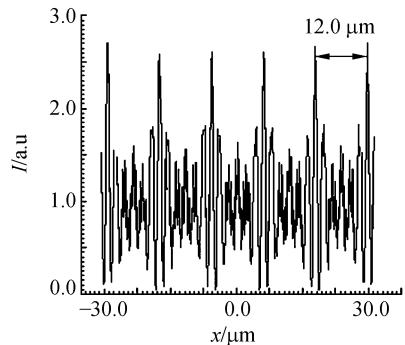


图 5 SWA 光学系统焦斑上  $x$  方向的焦斑中心处干涉条纹放大后的结果

Fig. 5 Amplified interference speckles at the centre for the Fig. 3

图 4、图 5 分别是 LA 和 SWA 沿  $x$  方向焦斑中心处干涉条纹放大后的计算结果,可以清楚地看到沿焦线方向的多光束干涉条纹,SWA 和 LA 的多光束干涉主极大间的距离分别为: $\Delta x=16.9 \mu\text{m}$  和  $\Delta x=12.0 \mu\text{m}$ ,和公式(6)、(7)计算的结果一致。而沿  $x$  方向的相应各单元的多光束干涉主极大间的各次极大的间距分别为  $\Delta x_{m,m'}=6.0 \mu\text{m}, 3.0 \mu\text{m}, 1.5 \mu\text{m}$ 。比较图 4~图 5 可知,SWA 系统比透镜列阵系统 LA 具有的优势还表现在 SWA 系统的光强的干涉次极大的包络高度要比透镜列阵系统 LA 的大很多,而且相应各单元的多光束干涉主极大间的各次极大的间距更为紧密,这对均匀性辐照极为有利。

图 6~图 8 给出采用楔角偏差和离焦打靶技术方法后,焦斑沿  $x$  方向中心放大的光强分布。

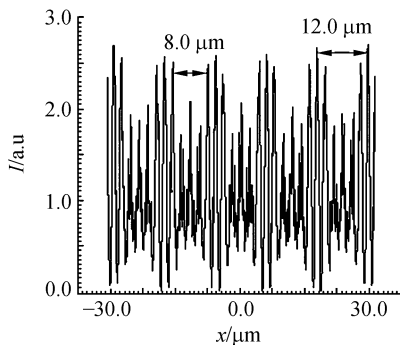


图 6 采取楔角偏差技术的正交 SWA 光学系统沿  $x$  方向在焦斑中心处光强分布放大后的结果

Fig. 6 Amplified intensity distribution along the  $x$  direction of SWA at the centre  $x=0 \text{ mm}$  with derivations of wedge angles

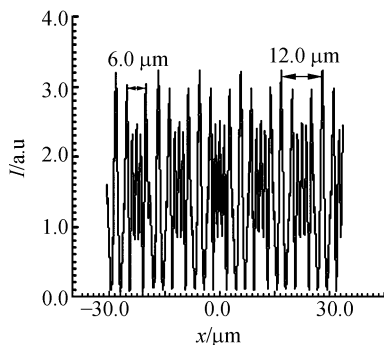


图 7 采取离焦打靶技术的正交 SWA 光学系统沿  $x$  方向在焦斑中心处光强分布放大后的结果

Fig. 7 Amplified intensity distribution along the  $x$  direction of SWA at the centre  $x=0 \text{ mm}$  with off-focal laser radiation on the target

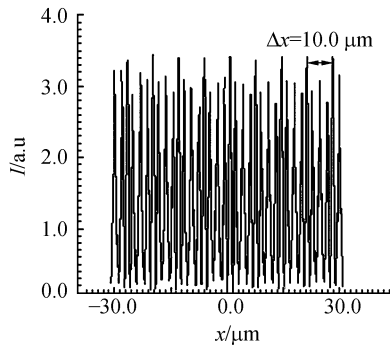


图 8 同时采取楔角偏差技术和离焦打靶技术的正交 SWA 光学系统沿  $x$  方向在焦斑中心处光强分布放大后的结果

Fig. 8 Amplified intensity distribution along the  $x$  direction of SWA at the centre  $x=0 \text{ mm}$  with both the off-focal laser radiation on the target and the derivations of wedge angles

图 6 中楔角偏差为:  $\delta_{pj} = 2.0\%$ ; 图 7 中离焦量为:  $\Delta Z = 2 \text{ mm}$ ; 分析图 6 可以看出, 利用加工光楔时有意地留下合理设计的楔角偏差使各子光束所产生的干涉条纹的略微错开, 干涉条纹的主极大分裂成了 3 个主极大; 次极大也增长, 使条纹密度增加。具体来说, 由图 5 可得到未采用任何措施时, SWA 系统的干涉主极大间隔为  $12.0 \mu\text{m}$ 。由图 6 知, 当采用了楔角偏差后, 干涉主极大分裂为 3 个主极大, 同时次极大也增大。干涉主极大间隔变为  $8.0 \mu\text{m}$ , 小尺度不均匀性得到明显的改善。

由图 7 可知, 将靶面放置离焦量为  $\Delta Z = 2 \text{ mm}$  的位置上时, 使各单元衍射分布不完全重叠, 彼此稍微错开, 干涉主极大分裂为 3 个主极大, 同时次极大也增大, 干涉主极大间隔变为  $6.0 \mu\text{m}$ , 次极大间隔约为  $1.9 \mu\text{m}$ 。

由图 8 计算同时考虑楔角偏差  $\delta_{pj} = 2.0\%$  和离焦量  $\Delta Z = 2 \text{ mm}$  时的情况。干涉主极大间隔为  $10.0 \mu\text{m}$  条纹的次极大增长到与主极大相当的强度其间隔约为  $2.5 \mu\text{m}$ , 可见, 小尺度不均匀性此时为最佳状态。干涉主极大间隔与没加这两种技术时比, 减小了 6 倍。

## 4 实验结果和比较

用现有的 CCD 摄像机来测定微米量级的多光束干涉的条纹间距是不可能的, 因为现有的一般 CCD 摄像机的分辨率还达不到精度要求。本文利用投影放大测试技术进行测量, 其原理如图 9 所示<sup>[9]</sup>。

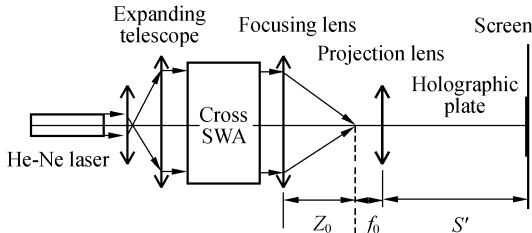


图 9 投影放大测试技术的测试原理

Fig. 9 Measuring principle by projection technique

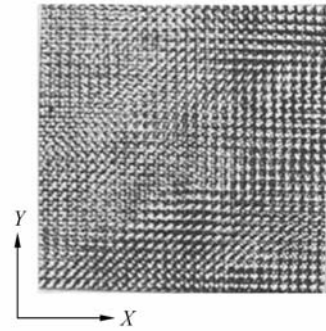
单模 He-Ne 激光经扩束器为平行准直光, 垂直射入正交 SWA 系统以及由投影物镜和 GS-I 型全息干板 (其分辨率为每毫米 2 500 线) 为接收

屏的投影放大系统。放大率为:

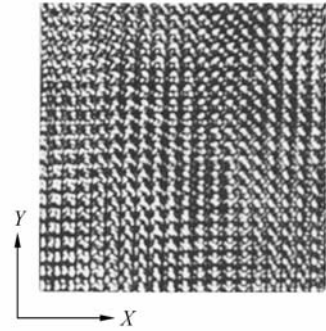
$$\beta = S' / f_0, \quad (10)$$

与其像距  $S'$  成正比。这样从全息干板上的干涉斑纹尺寸 (见图 10) 和系统的参数即可得到相邻两主极大的间距。

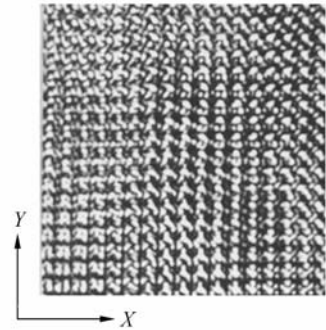
表 1 给出了 He-Ne 激光通过 7 单元正交 SWA 系统和投影放大系统的干涉条纹的间距随  $S_2$  变化的结果。其中正交 SWA 系统的单元数  $N = 7$ , 口径  $D = 100 \text{ mm}$ , 非球面透镜的焦距  $f = 200 \text{ mm}$ , 投影物镜的焦距  $f_0 = 40 \text{ mm}$ 。楔角偏差为  $\delta_{pj} = 2\%$ ; 实验中的离焦量为  $\Delta Z = 2 \text{ mm}$ 。



(a)



(b)



(c)

图 10 投影放大测试技术拍摄的照片

Fig. 10 Typical photos of interference speckle patterns on the holographic plate

表 1 对 7 单元正交 SWA 系统干涉条纹的间距计算和实验结果比较

Tab. 1 Comparison of experimental and numerical calculation results for a crossed 7-element SWA focus system.

$S_2$ (mm)	$l$ (mm)	$Z_0$ (mm)	$\beta$	$\Delta_{xe}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta_{ye}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta_{xa}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta_{ya}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta_{xd}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta_{yd}$ ( $\mu\text{m}$ )
120.0	7.5	200.0	79.5	12.5	11.2	12.0	10.9	12.6	11.2
220.0	8.6	171.4	77.0	14.1	12.8	13.7	12.5	14.3	13.1
320.0	10.0	133.3	72.5	16.3	15.3	16.0	14.6	16.5	17.7

表中  $\beta$  为投影系统的放大率,  $\Delta_{ie} - (i=x, y)$  为  $i$  方向实验测得的相邻两主极大的间距。  $\Delta_{ia} - (i=x, y)$  为由式(6)计算的相邻两主极大的间距。  $\Delta_{id} - (i=x, y)$  为由衍射积分计算的相邻两主极大的间距<sup>[5]</sup>。可见,物理光学、数值计算和实验测量的主极大间距符合得很好。二维的次极大太细微复杂,实验中无法精确的测出,但可从照片上粗略的看到变化规律。

## 5 结 论

使用列阵光学聚焦系统可以使靶面上的焦斑分布的大尺度不均匀性得到极大的改善。本文以正交光楔列阵系统为例,着重研究了多光束干涉条纹的间距即小尺度不均匀随焦斑尺寸的变化规律和用于改善小尺度不均匀性的楔角偏差和离焦打靶技术,从理论和实验的结果得出:

(1)应用物理光学推导出了多光束干涉主极大和次极大间距公式。正交 SWA 列阵聚焦系统的多光束干涉间距和次极大的间距在通常情况

下是不相等的,而且随着  $S_2$  和  $f$  的减小而减小,这样多光束干涉的空间频率增大,并引起多光束干涉的次极大增强,干涉条纹的对比度降低,这有利于减小小尺度的不均匀性。

(2)通过衍射积分理论和数值计算验证了以上公式和变化规律。

(3)计算分析和实验研究表明,楔角偏差和离焦技术,在有效抑制单元衍射效应引起的大尺度不均匀性的同时,还具有减小干涉条纹的间隔作用。优化设计楔角偏差和离焦的量值,分别为  $\delta_{pj} = 2.0\%$ ,  $\Delta Z = 2 \text{ mm}$  时,可使干涉条纹间隔变密 6 倍,小尺度的不均匀性大为改善。

此外还可用偏振控制 PCP<sup>[10]</sup>、部分偏振光 PCL<sup>[11]</sup>、随机位相板 RPP<sup>[12]</sup> 和光谱色散 SSD<sup>[13]</sup>, 以及应用两种等光束匀滑技术进一步抑制多光束干涉引起的小尺度的不均匀性<sup>[14-15]</sup>。本文所使用的理论分析方法可以推广于各种光楔系统、柱透镜列阵系统和透镜列阵系统以及多种技术的组合的情况。

## 参考文献:

[1] DENG X, LIANG X, CHENG Z, *et al.*. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. *Appl. Opt.*, 1986, 25(2): 377-381.

[2] 张增宝, 翁志成, 丛小杰, 等. 液晶背投影电视中蝇眼透镜阵列照明系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2): 126-129.

ZHANG Z B, WENG ZH CH, CONG X J, *et al.*. Design on a fly lens array illumination system applied in LC rear projective TV [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 126-129. (in Chinese)

[3] VILLENEUVE D M, ENRIGHT G D, BALDIS H A. Novel laser line focus geometry applied to X-ray lasers [J]. *Opt. Commun.*, 1991, 81(2): 54-58.

[4] 陈万年, 王树森, 陈斌, 等. 用于 X 射线激光实验研

究的列阵柱面透镜线聚焦系统 [J]. *光学学报*, 1991, 11(9): 829-833.

CHEN W N, WANG SH S, CHEN B, *et al.*. Cylindrical lens array focus system for X-ray laser experiments [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, 11(9): 829-833. (in Chinese)

[5] 郑建洲, 蔡邦维, 吕百达, 等. 二维正交光楔列阵大焦斑均匀照明光学系统的实验研究 [J]. *中国激光*, 1997, 24(11): 1008-1012.

ZHENG J ZH, CAI B W, LÜ B D, *et al.*. Experimental study of two-dimensional orthogonal segmented wedge array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(11): 1008-1012. (in Chinese)

[6] LÜ B D, ZHENG J ZH, CAI B W, *et al.*. Two-dimensional focusing of laser beams to provide uniform irradiation [J]. *Opt. Commun.*, 1998, 149

(4):19-26.

- [7] 郑建洲,于清旭,芦永军,等. 焦斑可调的透镜阵列均匀辐照光学系统[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 331-336.

ZHENG J ZH, YU Q X, LU Y J, *et al.*. Improved lens arrays optical system with controllable focus width for uniform irradiation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(3): 331-336. (in Chinese)

- [8] 郑建洲. 正交光楔阵列大尺度辐照均匀性的改善方法[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 1999, 23(2):196-200.

ZHENG J ZH. The improved methods of illumination uniformity of large-scale for the cross segmented wedge array (SWA) system [J]. *Journal of Hebei Normal University (Natural Science)*, 1999, 23(2):196-200. (in Chinese)

- [9] 郑建洲,蔡邦维,吕百达. 二维正交光楔阵列大焦斑均匀照明光学测试系统的研究[J]. 光学学报, 1997, 17(11):1581-1584.

ZHENG J ZH, CAI B W, LÜ B D. A testing system for two-dimensional orthogonal segmented wedge array applied to uniform illumination of large focal spot [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(11): 1581-1584. (in Chinese)

- [10] LWENTHAL F, PRG A, BALMER J E. Reduc-

tion of small-scale intensity modulation in a line focus produced by a cylindrical lens array using polarization control and wedge angles [J]. *Opt. Commun.*, 1997, 135(1):7-13.

- [11] NAKANO H, MIYANAGA N, YAGI K, *et al.*. Partially coherent light generated by using single and multimode optical fibers in a high-power Nd: glass laser system [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 63(5):580-582.

- [12] TSBAKIMOTO K, NAKATSUKA M, NAKANO H, *et al.*. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate using a polarization control plate [J]. *Opt. Commun.*, 1992, 91(1):9-12.

- [13] SKUPSKY S, SHORT R W, KESSLER T, *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light [J]. *J. Appl. Phys.*, 1989, 66(8):3456-3462.

- [14] SEAN P R, JOHN A M, JOHN H K, *et al.*. Experimental investigation of smoothing by spectral dispersion [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2000, 17(9):1483-1489.

- [15] ZHOU S L, LIN Z Q, JIANG X J. Beam smoothing by lens array with spectral dispersion [J]. *Opt. Commun.*, 2007, 272(1):186-191.

#### 作者简介:



郑建洲 (1960—),男,河南桐柏人,博士研究生,教授,主要从事激光的传输与控制 和靶面均匀辐照的研究。E-mail: zjz@dlnu.edu.cn



关寿华 (1972—),男,辽宁大连人,博士研究生,高工,主要从事光纤传感技术的研究。E-mail: gsh@dlnu.edu.cn



#### 导师简介:

于清旭(1955—),男,辽宁大连人,博士(后),教授,博士生导师,主要从事激光器件,红外激光光谱学以及光纤传感技术研究。E-mail: yuqx@dlut.edu.cn