

深紫外激光辐照加速材料老化系统的光学设计

赵阳, 向阳*, 李婷婷

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了研究深紫外光刻系统中多个熔石英镜片的使用寿命, 基于激光束空间整形理论以及无焦变倍原理, 设计一套满足实际工况的多镜片辐照加速材料老化系统。采用非球面柱透镜组对竖直方向的光强分布近似为高斯分布的光束进行整形, 再通过变倍缩束系统缩小光斑尺寸进而提高能量密度。整形后的系统在竖直方向上的最大光束均匀度为 96.8%, 缩束率为 0.2~0.5, 波像差的最大方均根值为 0.1778λ , 均小于 $\lambda/4$, 能量密度提高 4~25 倍。该系统可以模拟实际的工况条件, 满足多个镜片的辐照加速要求, 从而解决目前测试存在的实验周期长且耗费成本高等问题。

关键词 光学设计; 光束整形; 无焦变倍; 加速老化

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0522001

Optical Design of Deep Ultraviolet Laser Irradiation System for Accelerating Material Aging

Zhao Yang, Xiang Yang*, Li Tingting

School of Photoelectric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract In order to study the service life of multiple fused silica lenses in the deep ultraviolet lithography system, based on the theory of laser beam spatial shaping and the principle of afocal zoom, a set of multi-lens irradiation accelerated material aging system that meets the actual working conditions is designed. The aspheric cylindrical lens group is used to shape the beam whose light intensity distribution in the vertical direction is approximately Gaussian distribution, and then the beam spot size is reduced by the variable magnification beam reduction system to increase the energy density. The maximum uniformity of the beam spot in the vertical direction of the reshaped system is 96.8%, the beam shrinkage ratio is between 0.2 and 0.5, the maximum root mean square value of wave aberration is 0.1778λ , which is all less than $\lambda/4$, and the energy density is increased by 4~25 times. The system can simulate actual working conditions and meet the irradiation acceleration requirements of multiple lenses, thereby solving the problems of long experimental cycles and high cost in current tests.

Key words optical design; beam shaping; afocal zoom; accelerated aging

OCIS codes 220.2740; 120.4570; 080.2740

1 引言

光刻机是生产大规模集成电路的核心设备之一^[1-2], 具有技术难度最大、系统最复杂和单台价值最高等特点, 使之成为国外限制最严格的关键设备之一^[3]。特别自“中兴事件”发生以来, 国内科研人

员所关注的焦点基本上都是在研发制造芯片的光刻机方面。自 1990 年以来, 深紫外光刻机逐渐发展成主流的高端光刻机之一^[4-5]。深紫外光刻系统中, 长时间工作在重复频率高达几千赫兹的激光辐照环境下的光学元件, 其需要具有长期激光辐照的稳定性, 使用寿命必须维持数年, 因此需要准确评估深紫外

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2020-09-06; 录用日期: 2020-10-12

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX02201001)

* E-mail: xyciom@163.com

光刻系统中熔石英镜片的使用寿命,这对于指导前期加工、中期使用和后期维护具有重要意义。

实际的深紫外光刻系统中,良好的均匀性能够提高整个光刻系统的分辨率,反之则会严重影响光刻机的性能^[6]。由于距离激光器不同位置的镜片所受辐照的能量密度不同,因此其性能指标及使用寿命也有所不同。目前,常用的测试方法是直接对激光进行会聚,使用聚焦后的小光斑辐照镜片表面^[7-8],但该方法未进行匀光处理,而且与实际使用工况不符,并且只限于某一能量密度下对单个镜片的使用寿命进行评估。

针对现阶段材料老化实验测试方法的不足,本文首先根据光强分布在竖直方向上近似呈高斯分布的特点,采用非球面柱透镜组对单一方向的光束进行整形,然后根据无焦变倍的原理设计激光辐照加速材料老化的系统,最后调节系统的缩束率以改变能量密度。设计的加速老化系统的缩束率为 0.2~0.5,单脉冲能量密度增大至 8~50 mJ/cm²,并且结构简单,可以在低成本且短时间内评估多个元件的使用寿命。

2 光学系统结构的选取

2.1 系统参数

选用波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器作为曝光光源。由于实际深紫外光刻照明系统中要求入射至光束整形单元上的光束截面为正方形,因此选取经过柱面扩束单元调整后,单脉冲能量密度为 2 mJ/cm² 的光束作为输入光斑,其竖直方向的光束光强分布近似为高斯分布,水平方向光强分布近似为平顶分布,此时单脉冲能量密度为 2 mJ/cm²,具体参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	248
Spot size /(mm×mm)	20×20
Working distance /mm	500
Horizontal divergence angle /mrad	1.19
Vertical divergence angle /mrad	0.11

实验中,要求整形后的光斑尺寸基本不变,且光束均匀度大于 90%。根据实际使用要求,系统的缩束率为 0.2~0.5,能量密度提高 4~25 倍。

竖直方向上,光束中心的光强较强,边缘相对较弱,所以光斑中心位置易导致元件损伤。为了满足

光强分布近似呈均匀分布的工况条件,必须先对光束先进行整形再进行缩束的处理。

2.2 光束整形系统结构的选取

典型的激光束空间整形方法有光阑拦截法、微透镜阵列整形法、衍射元件整形法、全息滤波法以及非球面透镜整形法等。相比于前几种整形方法而言,非球面透镜整形法具有整形效果好、能量利用率高和结构简单等突出优势^[9-10]。非球面透镜组整形系统的基本结构有开普勒型结构和伽利略型结构两种,其中伽利略型结构比较紧凑,且整个系统没有实焦点,更适用于高功率的激光束。考虑到系统的激光能量很强,光束会聚后可能对光学元件造成热损伤,故系统选择没有内部焦点的伽利略型结构^[11]。

由于光强在两个方向上分布不同,所以这种轴对称光学系统无法单独改变某一方向的光强分布^[12]。对非轴对称的光学系统使用非球面柱透镜组来实现高斯光束的整形,可以获得光强分布近似呈平顶分布的矩形光斑。图 1 为非球面柱透镜在竖直方向上的光束整形过程。光束经过非球面柱透镜 L_{s1} 和 L_{s2} ,入射光在 x_2 方向上的光强分布近似保持平顶分布且传输方向不变,在 y_2 方向上将光束整形成光强分布近似均匀分布的光斑^[13]。

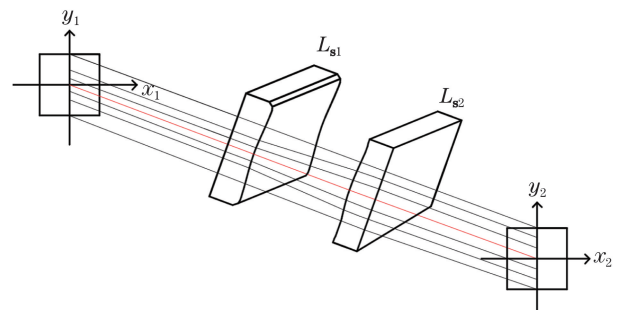


图 1 非球面柱透镜在竖直方向上的整形过程

Fig. 1 Shaping process of aspheric cylindrical lens in vertical direction

2.3 变倍缩束系统结构的选取

为了提高辐照的能量密度以加速样品老化,根据无焦变倍原理设计变倍缩束系统,通过改变光斑尺寸来改变能量密度,变倍缩束系统一般由固定组、变倍组和补偿组透镜组成。通常,三组元透镜组有“正—负—正”或“负—正—负”等多种结构形式。与“负—正—负”结构形式相比,“正—负—正”具有结构长度短和可快速变倍的优点。为了装调简单可行,将第一组透镜作为固定组,其他两组分别作为移动组和补偿组以实现无焦连续变倍的功能,结构如图 2 所示。

图 2(a)为一个倍率固定的定焦系统,其中 A 点为前固定组 L_1 的像点以及像方的焦点,也是变倍组 L_2 的物点;B 点为变倍组 L_2 的像点,也是补偿组 L_3 的物点以及物方的焦点。图 2(b)中的移动变倍组 L_2 和补偿组 L_3 可以实现无焦变焦,此时变倍组 L_2 的像点移动到 B' 点,出射光束的口径随着这

两组透镜的移动而发生变化,但系统仍然是一个无焦系统^[14], d_1 为前固定组 L_1 与变倍组 L_2 之间的间隔, d_2 为变倍组 L_2 与补偿组 L_3 之间的间隔, q 为变倍组 L_2 相对于起始位置的移动量, e 为补偿组 L_3 相对于起始位置的移动量。

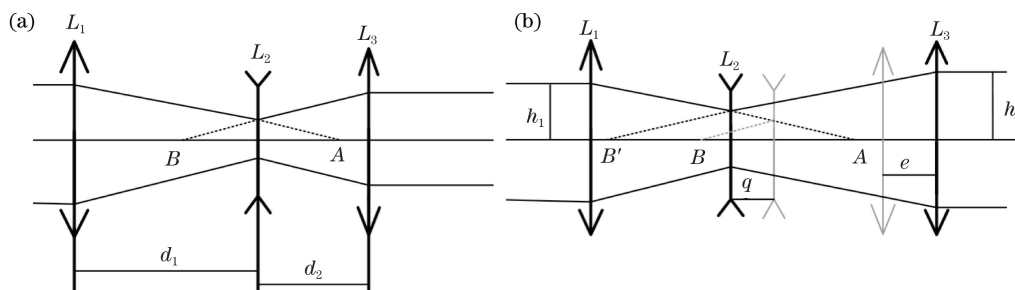


图 2 无焦变焦系统的原理图。(a)定焦系统;(b)变焦系统

Fig. 2 Schematic of afocal zoom system. (a) Focal fixation system; (b) zoom system

根据牛顿公式,无焦系统中变倍组 L_2 的垂轴放大率可表示为

$$m_2(q) = -\frac{f_2}{x} = \frac{f_2'}{f_1' + f_2' - (d_1 - q)}, \quad (1)$$

式中: f_2 为变倍组的物方焦距; x 为变倍组的物距; f_2' 为变倍组 L_2 的像方焦距; f_1' 为前固定组 L_1 的像方焦距。令 q 在变倍组 L_2 向右移动为正,向左移动为负。

补偿组 L_3 的移动量为

$$e = \frac{f_1' f_2' - (d_1 - q) f_2'}{f_1' + f_2' - (d_1 - q)} + f_3' - d_2 - q, \quad (2)$$

式中: f_3' 为变倍组 L_3 的像方焦距。令入射光的半径为 h_1 , 出射光的半径为 h_3 , 则系统的缩束比 M 可表示为

$$M = \frac{h_3}{h_1} = -\frac{f_3'}{f_1' m_2(q)}. \quad (3)$$

使用(1)~(3)式便可计算得到变倍组 L_2 与补偿组 L_3 相对前固定组 L_1 的移动规律。

3 光学系统的设计

由第 2 节的分析可知,激光辐照加速材料老化的系统分为三个部分,结构如图 3 所示。图 3(a)为光束整形系统,系统整体为伽利略形式的非球面柱透镜组,其中第一片柱透镜选用前表面为平面、后表面为凹面的结构形式,第二片透镜选用前表面为凸面、后表面为平面的结构形式。该整形系统可以将竖直方向的光强近似为高斯分布的光束整形为平顶光束,同时不改变水平方向的光强分布及光斑形状。图 3(b)为变倍缩束系统,通过缩小光斑尺寸来增加能量密度以加速材料老化,选用“正一负一正”的结构形式的三组透镜可以实现 0.2~0.5 的变倍缩束。图 3(c)为多组测试镜片。

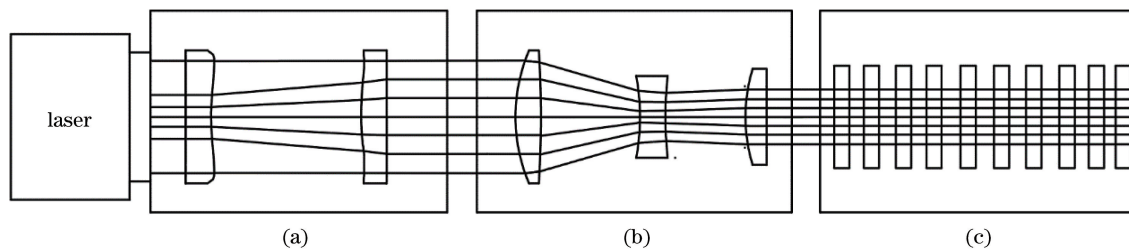


图 3 激光辐照加速材料老化的系统。(a)光束整形系统;(b)变倍缩束系统;(c)测试镜片

Fig. 3 System for accelerating material aging by laser irradiation. (a) Beam shaping system;

(b) variable bunching system; (c) test lens

3.1 非球面柱透镜组光束整形系统的设计

实验采用伽利略型结构的整形系统,柱透镜 L_{s1} 采用平或凹透镜,经过柱透镜 L_{s1} 的光线在传递

过程中不会产生实焦点,可以避免激光束的会聚对光学元件造成热损伤。相反,柱透镜 L_{s2} 采用凸或平结构,可以降低透镜的加工难度^[15]。在材料方

面, CaF₂ 具有透过率高、折射率低和相对色散大等优点, 而且在深紫外波段的透过性能和抗激光损伤能力更是远远优于其他材料, 故选择 CaF₂ 作为整形系统的光学材料。

为了便于光学软件的设计以及后期的生产加工, 分别将柱透镜 L_{s1} 的凹面和 L_{s2} 的凸面设为偶次非球面, 偶次非球面的表达式为

$$Z = cr^2 / [1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}] + \sum_{i=2}^6 A_i r^{2i}, \quad (4)$$

式中: c 为顶点曲率; k 为圆锥系数; A_i 为高次项系数^[16-17]; r 为半径。将上述参数均设为变量, 使用“实际 Y 向坐标值 (REAY)”和“实际光线角度 (RAID)”操作数分别控制每条光线的投射高度和角度, 并通过控制这两个操作数的权重对变量进行优化, 从而实现光强的均匀分布以及匀化光束的准直射出, 说明在整形系统的光束出射端处可以实现最佳的匀化效果, 且在出射端后 500 mm 以内均有较好的匀化效果。设计的光学参数如表 2 所示, 该参数可以使系统具有良好的光学性能。

表 2 非球面柱透镜的光学参数

Table 2 Optical parameters of aspheric cylindrical lens

Parameter	Aspheric 1	Aspheric 2
$[-1/c(r)]/\text{mm}$	35.785	68.600
k	5.213	-6.469
A_4	-1.9821×10^{-6}	-1.3753×10^{-5}
A_6	2.3778×10^{-6}	1.4538×10^{-7}
A_8	-2.4023×10^{-8}	-5.0634×10^{-9}
A_{10}	1.2003×10^{-10}	5.7809×10^{-11}
A_{12}	-2.3512×10^{-13}	-2.2945×10^{-13}

竖直方向上高斯光束的整形效果如图 4 所示。从图 4 可以看到, 经过整形后, 光束的均匀性得到很大的提高, 由于整形系统仅对竖直方向上的光束进行整形, 不改变水平方向上光束的光斑尺寸及光强分布, 设计得到的光斑尺寸基本不变。

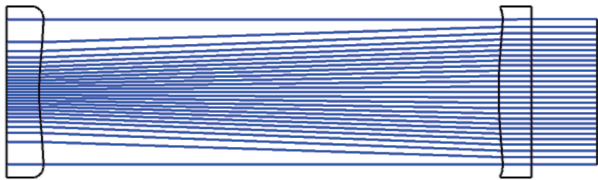


图 4 竖直方向上高斯光束的整形效果

Fig. 4 Shaping effect of Gaussian beam in vertical direction

3.1.1 光束均匀度分析

均匀度是评价光束匀化的最重要指标之一^[18],

均匀度的表达式为

$$\gamma = \left(1 - \frac{\sum |I_j - \bar{I}|}{N \cdot \bar{I}} \right) \times 100\%, \quad (5)$$

式中: γ 为光束均匀度; I_j 为采样点的光强; \bar{I} 为平均光强; N 为取样点个数。图 5 为整形系统后不同位置处的光斑均匀度。从图 5 可以看到, 距离系统 0 mm 处 (即整形系统出射端) 的光束均匀度最大, 该处光束的均匀度为 96.8%, 其他典型位置处光束的均匀度大于 90%, 满足实际工况的要求。

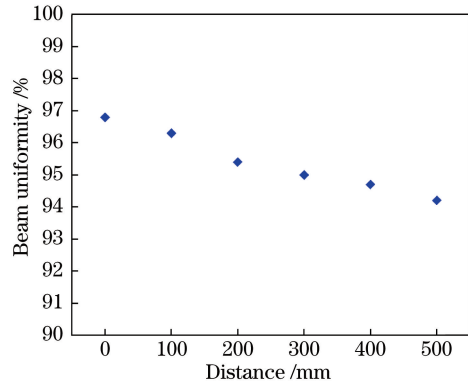


图 5 距离整形系统不同位置处的光束均匀度

Fig. 5 Beam uniformity at different positions of distance shaping system

图 6 为距离整形系统 0 mm 处的竖直方向照度分布。从图 6 可以看到, 整形后的光强分布均匀,

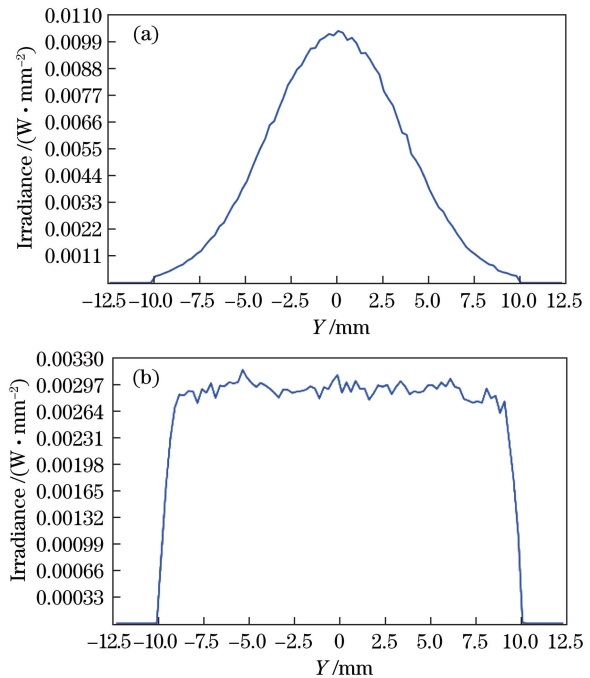


图 6 光束整形前后的照度分布。(a) 整形前; (b) 整形后

Fig. 6 Illumination distribution before and after beam shaping. (a) Before shaping; (b) after shaping

光强近似为整形前的 30%，说明整形后的系统可以避免因光强分布不均导致的自聚焦效应，达到光束整形的目的，满足辐照损伤的测试条件。

3.2 变倍缩束系统的设计

通过 2.3 节的分析,使用光学设计软件来建立变倍缩束系统的初始结构^[19-20],材料均为耐紫外辐照的 CaF_2 。不同的组合状态,则系统的缩束比值不同,实验设置 4 组多重结构,缩束率分别为 0.2、0.3、0.4 和 0.5。图 7 为不同倍率下变倍缩束系统的结构。从图 7 可以看到,随着变倍组和补偿组的移动,出射光斑的尺寸随之改变,从而改变能量密度。当缩束率为 0.2~0.5 时,单脉冲能量密度增大至 $8\sim 50 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ 。

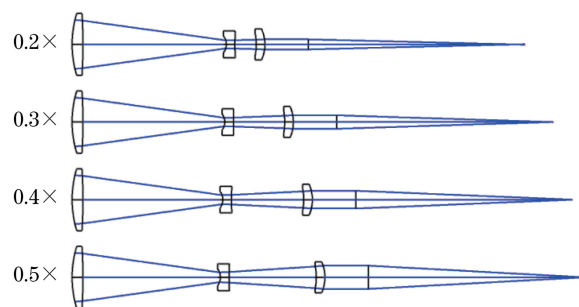


图 7 变倍缩束系统的结构图

Fig. 7 Structure diagram of variable magnification and reduction beam system

图 8 为不同倍率下的光迹图。从图 8 可以看到,光束经过变倍系统缩束后,光斑仍分布均匀,满足设计的要求。

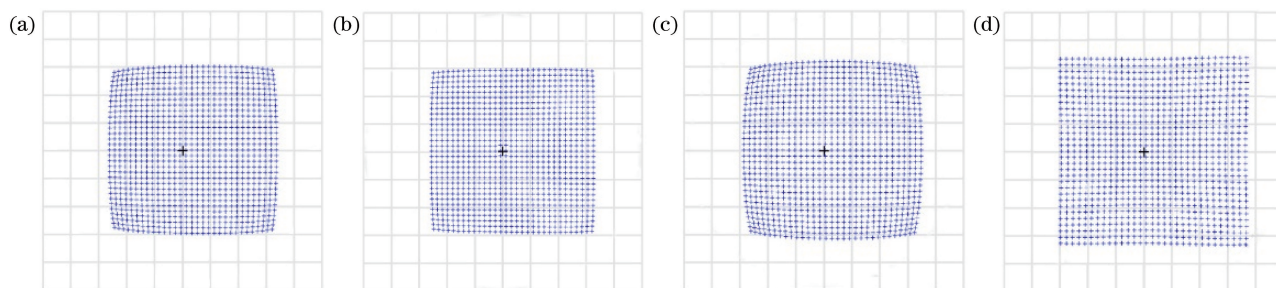


图 8 不同倍率下变倍缩束系统的光迹。(a) 0.2×; (b) 0.3×; (c) 0.4×; (d) 0.5×

Fig. 8 Light traces of variable magnification and reduction beam system under different magnifications.

(a) 0.2×; (b) 0.3×; (c) 0.4×; (d) 0.5×

激光变倍缩束系统属于一个小像差系统,一般使用波像差对其成像质量进行评价。在整个光学系统后端加入一个理想透镜对其聚焦以观察其波像差,用来评价成像质量。各倍率下的波像差如图 9 所示。从图 9 可以看到,缩束率为 0.2 的 RMS

为 0.1736λ ,缩束率为 0.3 的 RMS 为 0.1577λ ,缩束率为 0.3 的 RMS 为 0.0728λ ,当缩束率为 0.5 时,波像差最大方均根(RMS)值为 0.1778λ ,其余倍数下均小于 $\lambda/4$,满足像质的评价要求,其中 λ 为波长。

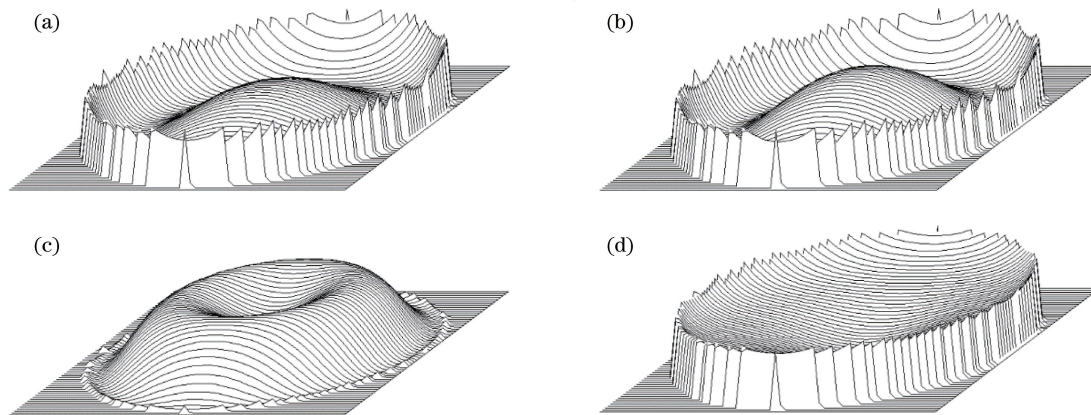


图 9 不同倍率下变倍缩束系统的波像差。(a) 0.2×; (b) 0.3×; (c) 0.4×; (d) 0.5×

Fig. 9 Wave aberration of variable magnification and reduction beam system under different magnifications.

(a) 0.2×; (b) 0.3×; (c) 0.4×; (d) 0.5×

4 公差分析

为了确保设计的加速材料老化系统具有可加工性,运用光学设计软件对其进行公差分析。使用灵敏度和蒙特卡罗法对 100 个随机镜头进行分析,整理后确定的公差数据如表 3 所示。从表 3 可以看到,在给定公差的基础上,整形系统的均匀性满足使用要求,预估变倍缩束系统的最大波像差为 0.1935λ ,小于 $\lambda/4$,公差范围适当,便于后期实际加工。

表 3 光学系统的公差参数

Table 3 Tolerance parameters of optical system

Thickness / mm	Aperture number	Decentration / mm	Tilt / (°)
± 0.05	± 2	± 0.05	± 0.1

5 结 论

根据激光束整形及无焦变倍的原理,设计一套满足实际工况条件下的多镜片激光辐照加速材料老化系统。整形后的系统在竖直方向上的最大光束均匀度为 96.8%,变倍缩束后的能量密度提高 4~25 倍,此系统结构简单,镜片数少,可以模拟实际的工况条件,可以调节不同能量密度对多个镜片的寿命进行评估。以波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光器作为曝光光源,对其余深紫外波段激光辐照加速材料老化寿命的评估同样具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Lin J X, Dong L S, Fan T A, et al. Fast extreme ultraviolet lithography mask near-field calculation method based on machine learning[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(9): 2829-2838.
- [2] Bonakdar A, Rezaei M, Brown R L, et al. Deep-UV microsphere projection lithography[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(11): 2537-2540.
- [3] Zhang L J, Qi Y J, Zhang L Y, et al. Research on intellectual property strategy of lithography equipment [J]. *Science Technology and Industry*, 2019, 19(2): 106-112.
张立佳, 齐月静, 张理垚, 等. 光刻设备知识产权战略研究[J]. *科技和产业*, 2019, 19(2): 106-112.
- [4] Levinson H J. *Principles of lithography*[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2005.
- [5] Ming R F, Wei Y Y, Dong L S. Influence of optical system aberration on critical dimension of EUV lithography imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1222001.
- [6] Yin C, Li Y Q, Yan X, et al. Tolerance analysis of micromirror array in deep ultraviolet lithography illumination system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(7): 0722001.
尹超, 李艳秋, 闫旭, 等. 深紫外光刻照明系统的微反射镜阵列公差分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(7): 0722001.
- [7] Zhang L C, Zhao L, Cai X K, et al. Accelerated testing method for ascertaining aging life of optical material under laser irradiation: CN104297153A[P]. 2015-01-21.
张立超, 赵灵, 才玺坤, 等. 用于确定光学材料激光辐照老化寿命的加速实验方法: CN104297153A[P]. 2015-01-21.
- [8] Liberman V, Palmacci S, Geurtsen G P, et al. High fluence testing of optical materials for 193-nm lithography extensions applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7640: 76402Z.
- [9] Olikier V, Doskolovich L L, Bykov D A. Beam shaping with a Plano-freeform lens pair [J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19406-19419.
- [10] Yang Z K, Ma X H, Fang J Y, et al. Tunable bottle beam of semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1105001.
杨智焜, 马晓辉, 房俊宇, 等. 半导体激光可调谐局域空心光束 [J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1105001.
- [11] Pan Y S. Laser beam shaping using aspheric optical system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
潘毅思. 采用非球面光学系统实现激光束整形 [D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [12] Roy Frieden B. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(11): 1400-1403.
- [13] Shi G Y. Gaussian beam shaping based on aspheric cylindrical lens [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2014.
史光远. 基于非球面柱透镜的高斯光束整形 [D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [14] Wang P F, Xiang Y, Gao J, et al. Design of collimating and beam expanding laser system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(9): 0922007.
王培芳, 向阳, 高健, 等. 激光变倍准直扩束系统设计 [J]. *光学学报*, 2015, 35(9): 0922007.
- [15] Zhu K J, Shi S, Chen Z G, et al. Prediction of Profile Deviation during Glass Molding of Double-Aspheric Lens [J]. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2020, 13(2): 50-56.

- [16] Bian Y Y, Liu Y J, Liu B K, et al. Contact lens for controlling myopia progression and correcting myopia and astigmatism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(4): 0422001.
边亚燕, 刘永基, 刘宝凯, 等. 控制近视进展并矫正近视散光的隐形眼镜[J]. *光学学报*, 2020, 40(4): 0422001.
- [17] Jia M, Xue C X. Design of dual-band infrared optical system with Q-type asphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 1022001.
贾孟, 薛常喜. 基于 Q-type 非球面的双波段红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 1022001.
- [18] Sun Y B. Research of beam homogenizing technology for diode laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
孙玉博. 半导体激光器光束匀化技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [19] Chen H D, Xue C X. Design of mid-wave infrared optical system with high variable ratio miniaturization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(2): 0222001.
陈虹达, 薛常喜. 高变倍比小型化的中波红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(2): 0222001.
- [20] Ge J Q, Qin Y X, Liu X D, et al. Design of variable spot and zoom optical system for laser cutting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0222001.
葛佳琪, 秦应雄, 刘晓东, 等. 变斑变焦激光切割光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0222001.