

提高深紫外光刻照明系统扩束单元光束均匀性的方法

赵 阳 巩 岩

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 在曝光线宽为 90 nm 节点的投影光刻机照明系统中, 针对准分子激光光源扩束后出射光束均匀性较差的问题, 用高斯光束边缘叠加能够提高均匀性的原理对反射式扩束单元进行了分析。结果表明, 平行反射式扩束单元出射光束之间叠加尺寸与反射板某区域透射率存在矛盾, 制约了照明光束均匀性的提高。为此, 提出了非平行反射扩束镜组, 推导了出射光束尺寸、叠加子光束个数与两反射镜楔角之间的关系式, 确定了楔角的取值范围和扩束单元的结构形式。通过建模分析, 验证了设计的扩束单元在实现光束一维扩束的同时, 不仅减小了叠加光束的干涉散斑效应, 还提高了光束均匀性。

关键词 几何光学; 非平行反射扩束单元; 子光束叠加; 照明均匀性

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0822004

Methods of Enhancing Uniformities of Output Beams from Beam Expanding Unit for Illumination System of Deep-Ultraviolet Lithography

Zhao Yang Gong Yan

(State Key Laboratory of Applied optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract According to the problem of bad uniformities of expanding beams for excimer laser of projected lithography which holds 90 nm exposure linewidth, a kind of reflective beam expanding unit is modified based on the principle that the beam edges of Gaussian type can be superposed to enhance uniformities. It is shown that there is a contradiction between the sizes of superposing beams and the transmission rate on some areas of the parallel-reflective beam expander, in that case the improved capacities for the beam uniformities are restricted. Based on the above analysis, a non-parallel reflective beams expanding unit is proposed. The relational expressions about output beam sizes, number of superposed sub-beam units and wedge angle between two mirrors are deduced and the span of wedge angle and the structure of beam expanding unit are determined based on the deduced equations. The proposed beam expanding unit is proved to be useful to achieve beam expanding, as well as to reduce the interfering speckle effects. And the uniformities of output beams is increase.

Key words geometric optics; non-parallel reflective beam expanding unit; sub-beam unit superposing; illumination uniformity

OCIS codes 080.2208; 080.2740; 080.4035; 080.4298

1 引 言

深紫外透射式投影光刻机是目前用于加工曝光线宽为 90 nm、65 nm 乃至 45 nm 的极大规模集成电路芯片的主流设备。这类光刻机最核心的部件是

投影曝光光学系统, 该系统又分为照明系统和投影物镜两个主要组成部分。照明系统的作用是为整个掩模面提供高均匀性照明、控制曝光剂量和实现离轴照明模式, 从而提高光刻系统分辨率和增大焦深

收稿日期: 2012-02-04; **收到修改稿日期**: 2012-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(40974110)资助课题。

作者简介: 赵 阳(1982—), 男, 助理研究员, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: juventus-xx@126.com

(DOF)^[1,2]。主要由扩束单元、光束传输单元、能量监测与控制单元、光束整形单元、匀光单元、可变光阑狭缝单元和照明物镜组成。本文的研究对象是 90 nm 分辨率投影光刻机,照明光源使用准分子激光器,该光源的特点是发出的光束截面是 12 mm × 2 mm 的矩形。为了提高照明系统中光束整形单元的光束整形效率,要求整形单元的入射光束截面为正方形,因此首先要用一维扩束单元将激光光束调整成 12 mm × 12 mm 的正方形对称截面^[3]。目前常用的扩束装置有柱面镜组^[4~6]、渐变透射率板反射镜组^[7,8]和多组元平行反射扩束镜组^[9]。准分子激光器的出射光束在一个方向上呈高斯分布,使得扩束后的出射光束均匀性较差,而光刻机对照明均匀性提出了极高的要求,例如传统照明的照明均匀性优于 2.5%,环形照明、二级照明和四极照明的照明均匀性优于 3%,使得匀光单元的设计难度极大,因此,提高照明系统各个环节光束的均匀性是十分必要的。根据文献^[9]的分析,相对于柱面镜组而言,反射式扩束装置能够有效减小散斑效应^[10],有利于提高照明系统均匀性。根据照明光源的特点,以渐变透射率板扩束单元为研究对象,阐述提高出射光束均匀性的原理与方法。在此基础上讨论反射镜之间的夹角、出射子光束叠加尺寸之间的关系,提出非平行反射扩束镜组,在实现光束扩束功能的同时,出射光束的均匀性由原来的 25% 提高到 11.86%,提高幅度达 52.56%。仿真结果验证了这

种扩束单元对于提高照明均匀性确实有效。

2 提高扩束单元出射光束均匀性的原理

2.1 反射式一维扩束单元

作为深紫外光刻机照明光源的 ArF 准分子激光器的出射光束光强分布如图 1 所示^[9],光源在 X、Y 方向尺寸为 12 mm × 2 mm,发散角分别为 1.5 mrad 和 2.5 mrad,光强分别呈平顶分布和高斯分布^[11]。光源经过渐变透射率板扩束单元后生成 12 mm × 12 mm 的正方形照明光斑,扩束装置如图 2 所示。M₁ 为全反射镜, M₂ 为渐变透射率板,“渐变透射率”的含义是 M₂ 上光线顺序照射的不同子单元(如 a, b)的反射率值呈阶梯状依次递减,以保证每个出射子光束光强相同。M₁ 和 M₂ 严格平行,且均与竖直方向成 β 角。该结构的扩束原理如下:光源发出的矩形光束首先经过子单元 a,发生透射和反射,透射光束称为第一子光束,反射光束经过 M₁ 全部反射到 M₂ 上 a 的相邻子单元 b,再次发生透射和反射,其中的透射光束称为第二子光束,而反射光束在 M₁、M₂ 之间依次传播,各相邻出射子光束拼接实现一维扩束。设定 M₁ 和 M₂ 之间的距离大于光束相干长度的一半,那么各出射子光束之间没有时间相干性。此外,该装置通过子光束拼接原理实现扩束,光束尺寸本身没有被放大,空间相干性没有增加,因此有效减小了干涉散斑效应。

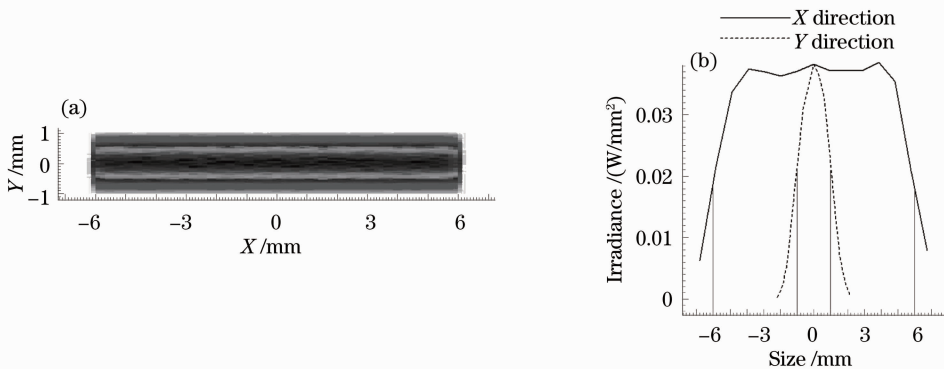


图 1 准分子激光光源光强分布。(a)二维光强分布;(b)光强分布曲线

Fig. 1 Intensity distributions of excimer laser source. (a) Two-dimensional intensity distribution; (b) curves of intensity distribution

经过该装置后光强分布如图 3 所示。照明光束均匀性定义为

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中 I_{\max} 和 I_{\min} 分别为接收面的最大和最小光强值,根据图 3(b)可以算出出射光束均匀性为 25%,光束

经过照明系统整形单元后均匀性还会劣化,匀光单元的设计难度依然很大。为此,在光源扩束阶段就需要尽可能提高光束均匀性。

2.2 子光束叠加原理

根据光源在 Y 方向光强呈高斯分布的特点,提

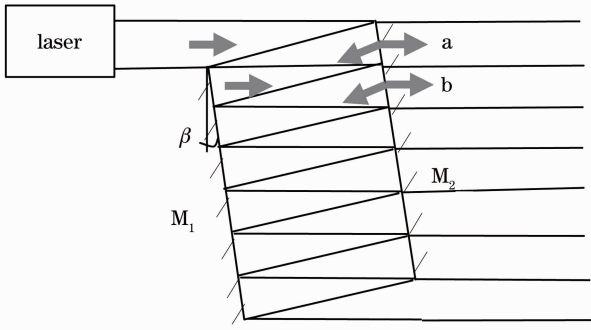


图 2 渐变透射率板扩束装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of beam expanding unit of graded transmission plates

高光束均匀性较好的办法是使相邻出射子光束的边缘有部分叠加^[12],原理如图 4 所示。理论分析可知,当两个相邻子光束的叠加量大约为子光束 Y 方向宽度的一半(即 1 mm)时,光束叠加后均匀性最好。以渐变透射率板扩束单元为例,由几何光学可知,为了实现光束叠加,入射光束须从右向左入射,因此需要添加折转反射镜 M_3 和 M_4 ,如图 5 所示。实现光束叠加的方式有两种:减小两镜之间间隔 d ,或等量减小两镜与 Y 轴的倾角 β 。前一种方法因间隔减小,可能导致相邻出射光束的光程差小于相干长度,使叠加的光束发生干涉,产生散斑效应。因此本文仅就后一种方法进行分析。

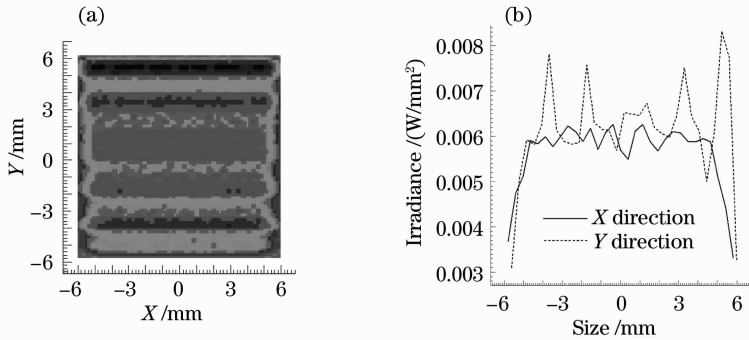


图 3 扩束后的光强分布。(a)二维光强分布；(b)光强分布曲线

Fig. 3 Intensity distributions after beam expanding. (a) Two-dimensional intensity distribution; (b) curves of intensity distribution

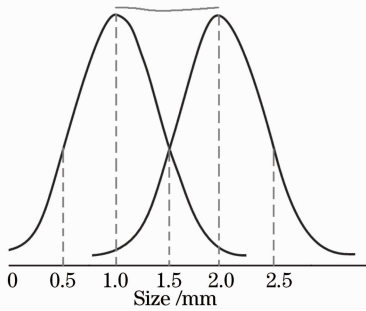


图 4 高斯光束叠加提高均匀性的原理

Fig. 4 Principle of enhancing uniformity by superposed Gaussian beams

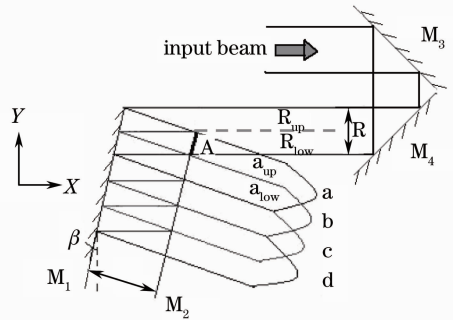


图 5 光束叠加装置原理图

Fig. 5 Schematic diagram of beam superposing device

2.3 渐变透射率板镜组改进

如图 5 所示, M_2 镜的 A 区域存在透射率取值的问题。这是因为 A 区域既要使初始入射光束 R 的下半部分 R_{low} 反射,又要使从 M_1 反射回来的光束 R_{up} 透射,上述两个光路合并,构成 a 的上半部分 a_{up} 。如果区域 A 镀增透膜或增反膜,那么 a_{up} 包含入射光束近一半的能量,如图 6 所示;如果区域 A 镀部分反射部分透射膜,那么 a_{up} 由两个光路能量合

并,仍然占据大部分入射光能量,如图 7 所示。为了避免这种情况的发生,只能通过改变镜面倾角 β 来减少光束叠加区域 A 的面积,这说明光束叠加原理在这种扩束装置中的应用受到了约束。

对 β 角取不同值时,子光束的叠加量和输出光束均匀性之间的关系进行了分析,结果如表 1 所示,当 β 为 1.40° 时,出射光束均匀性较好,此时子光束的叠加量为 0.477 mm ,光强分布如图 8 所示。与

没有光束叠加的渐变透射率板相比,输出光束的均匀性由 25% 提高到了 17.7%。由于子光束叠加量

较小,出射光束均匀性的提高程度受到了约束。

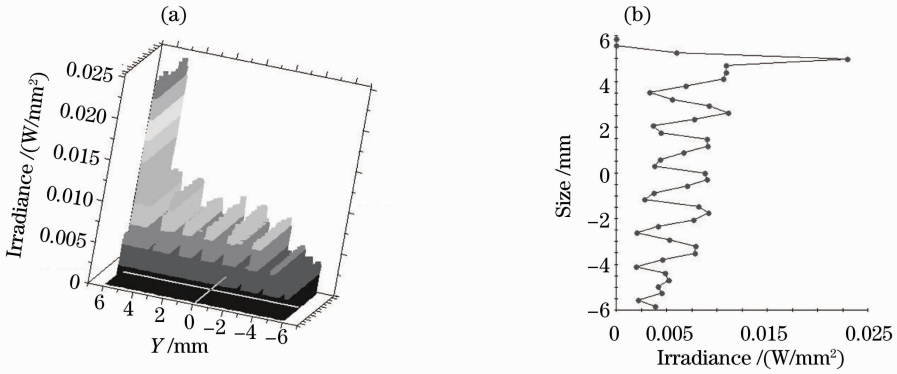


图 6 A 区域镀增透膜式增反膜时的光强分布。(a)三维光强分布; (b)光强分布曲线

Fig. 6 Intensity distributions by coating reflection reducing or reflection enhancing films on area A. (a) Three-dimensional intensity distribution; (b) curve of intensity distribution

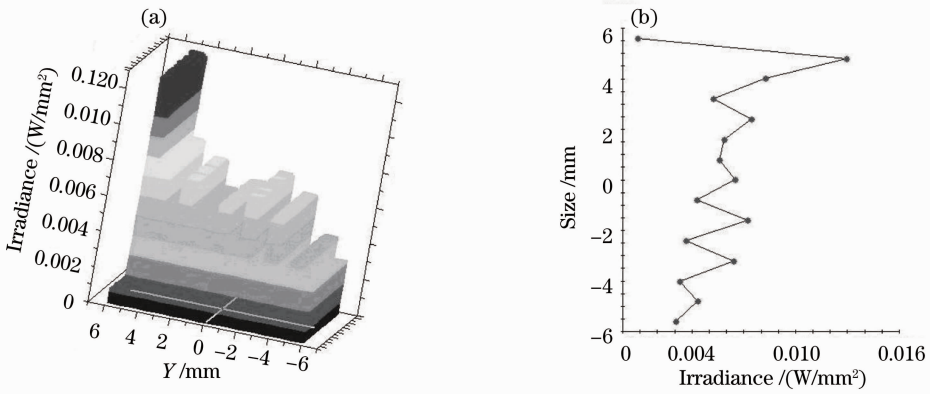


图 7 A 区域镀部分反射部分透射膜时的光强分布。(a)三维光强分布; (b)光强分布曲线

Fig. 7 Intensity distributions by coating partial reflection and partial transmission films on area A. (a) Three-dimensional intensity distribution; (b) curve of intensity distribution

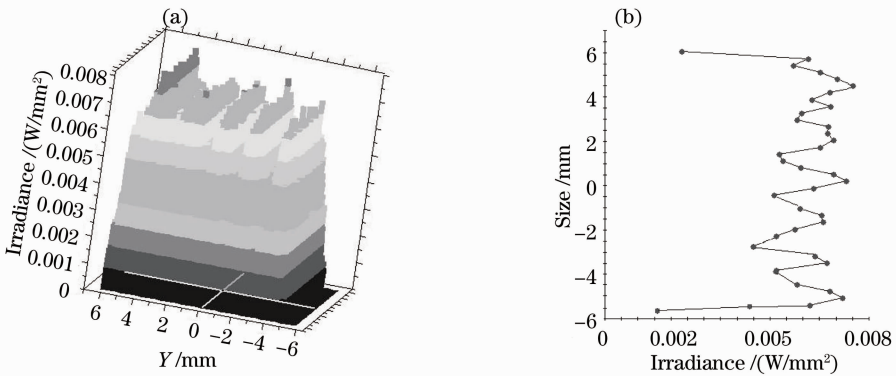


图 8 叠加量为 0.477 mm 时的出射光强分布。(a)三维光强分布; (b)光强分布曲线

Fig. 8 Intensity distributions as superposed size is 0.477 mm. (a) Three-dimensional intensity distribution; (b) curve of intensity distribution

表 1 不同倾角 β 时扩束单元出射光束均匀性比较Table 1 Uniformities of beam expanding units with different β

$\beta / (^{\circ})$	1.20	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.5
Superposed size /mm	0.98	0.854	0.729	0.603	0.477	0.352	0.226
Uniformity /%	28.5	40.9	27.3	23.1	17.7	31.5	31

3 非平行反射扩束镜组设计

为了进一步提高扩束单元出射光束的均匀性,增加相邻高斯光束边缘的叠加量,提出非平行双反射镜组结构。基本设计思想是:两个反射镜之间形成楔角 α ,如图 9 所示。最初几个出射子光束之间的叠加量仍然较小,以保证出射光束波动不会太大,随着光束在两反射镜间反射、透射次数增多,出射子光束边缘叠加量越来越大,有利于提高光束均匀性。而且与上述渐变透射率板扩束装置相比,这种扩束单元的优点是对入射到扩束镜组的光束的方向不再有限制,不再需要图 5 中的折转反射镜 M_3 和 M_4 。

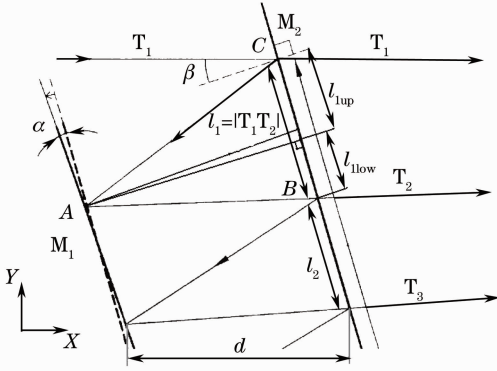


图 9 光束沿正 X 方向入射到非平行双反射扩束单元

Fig. 9 Light beams enter the non-parallel beam expanding unit along +X direction

当光束从左向右入射时,存在 M_1 偏转和 M_2 偏转两种情况,由于 M_2 拼接结构调节复杂,只讨论当 M_1 有偏转角 α 时的情况,如图 9 所示。以渐变透射率板扩束单元为初始模型, M_1 逆时针旋转 α 角,由于 α 角较小,近似认为两镜之间的间距不变。入射光束的上边缘光束用 T_1 表示,下面从 T_1 的传播过程来分析光束叠加规律。 T_1 首先经过 M_2 后发生透射和反射,其中部分光束经 M_2 透射成为第一出射子光束的上边缘光束 T_1 ;其余光束分别经 M_2 、 M_1 反射,再经 M_2 透射后成为第二出射子光束的上边缘光束,用 T_2 表示。定义 l_i 是第 i 个出射子光束上边缘光束到第 $i+1$ 个出射子光束上边缘光束在 M_2 方向上投影的距离,即 $l_i = |T_i T_{i+1}|$ 。由 M_1 镜向 M_2 镜引垂线,将 l_i 分解为 l_{iup} 和 l_{ilow} 。在三角形 ABC 中,根据几何关系

$$l_{1up} = d \sin \beta, \quad l_{1low} = d \sin(\beta - 2\alpha), \quad (2)$$

可以得到

$$l_1 = l_{1up} + l_{1low} = d \sin \beta + d \sin(\beta - 2\alpha), \quad (3)$$

可知 l_1 小于入射光束宽度 $2d \sin \beta$,实现了子光束的叠加。同理,

$$l_2 = d \sin(\beta - 2\alpha) + d \sin(\beta - 4\alpha), \quad (4)$$

$$l_n = d \sin[\beta - 2(n-1)\alpha] + d \sin(\beta - 2n\alpha), \quad (5)$$

由此得到 n 个出射子光束在 Y 方向的光束总尺寸 L_n 为

$$\begin{aligned} L_n &= l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} = d \sin \beta + d \sin(\beta - 2\alpha) + d \sin(\beta - 2\alpha) + \\ & d \sin(\beta - 4\alpha) + \dots + d \sin[\beta - 2(n-2)\alpha] + d \sin[\beta - 2(n-1)\alpha] = \\ & d \sin \beta + 2d \{ \sin(\beta - 2\alpha) + \sin(\beta - 4\alpha) + \dots + \sin[\beta - 2(n-2)\alpha] \} + d \sin[\beta - 2(n-1)\alpha]. \end{aligned} \quad (6)$$

由于 α, β 角值较小,作如下近似: $\sin \beta = \beta, \sin \alpha = \alpha$ 。(6)式简化为

$$\begin{aligned} L_n &= d\beta + 2d \{ (\beta - 2\alpha) + (\beta - 4\alpha) + \dots + [\beta - 2(n-2)\alpha] \} + d[\beta - 2(n-1)\alpha] = \\ & d\beta + 2d \{ (n-2)\beta - 2\alpha[1 + 2 + \dots + (n-2)] \} + d[\beta - 2(n-1)\alpha] = 2d(n-1)\beta - 2d(n-1)^2\alpha. \end{aligned} \quad (7)$$

M_1, M_2 的间隔 d 和 β 根据减小散斑效应的原则,分别取 30 mm 和 1.91° ^[9]。 L_n 的值与楔角 α 和出射子光束个数 n 有关。当 α 给定时,随着光束在两镜之间逐次反射,反射光线与 M_2 镜法线夹角递减,当反射次数达到某一值时,入射到 M_2 的光线与 M_2 法线平行,即入射角为零,此时 L_n 达到极值。随

着 n 继续增大,出射光束按原来扩束方向的反方向(正 Y 方向)叠加,而且出射子光束与 X 方向的偏离角越来越大,大发散角对照明系统的性能产生很大影响,因此只讨论 L_n 达到极值之前时的情况。 L_n 取极值时, n 与 α 的关系可以对(7)式求导得出。图 10 为出射子光束个数 n 、楔角 α 与 L_n 之间的关系曲线,

可知为了使 $L_n = 12 \text{ mm}$, 只需 $\alpha \leq 0.05^\circ$. 但 α 值不能取得过小, 否则相邻子光束之间的叠加量会很小, 其均匀性提高幅度不明显. 参考图 10, 确定楔角 α 较合适的取值范围为 $0.02^\circ \sim 0.05^\circ$.

4 仿真试验

用 Lighttools 软件仿真得到不同 α 时出射光束子光束个数和输出光束均匀性之间的关系如表 2 所示. 当 $\alpha = 0.05^\circ$ 时, 扩束单元出射光束均匀性达到 11.86%, 仿真结果如图 11 所示, 光束均匀性得到明显改善.

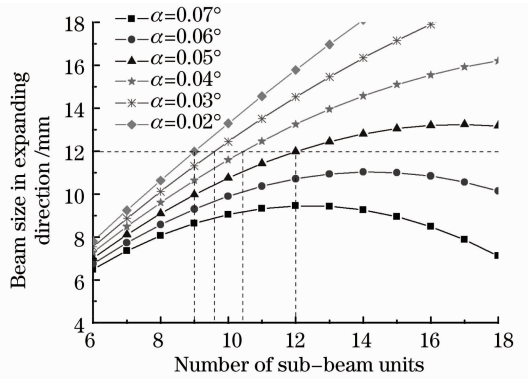


图 10 扩束后光束总尺寸与楔角和出射子光束个数的关系
Fig. 10 Relation between expanded beam size and number of sub-beam units for different wedge angles

表 2 不同楔角 α 时扩束单元出射光强均匀性比较

Table 2 Uniformities of beam expanding units with different α

$\alpha / (^\circ)$	0.02	0.03	0.04	0.05	Graded transmissivity plates unit
Nubmer of sub-beams	9	10	11	12	6
Uniformity / %	22.1	13, 19	12, 78	11.86	25

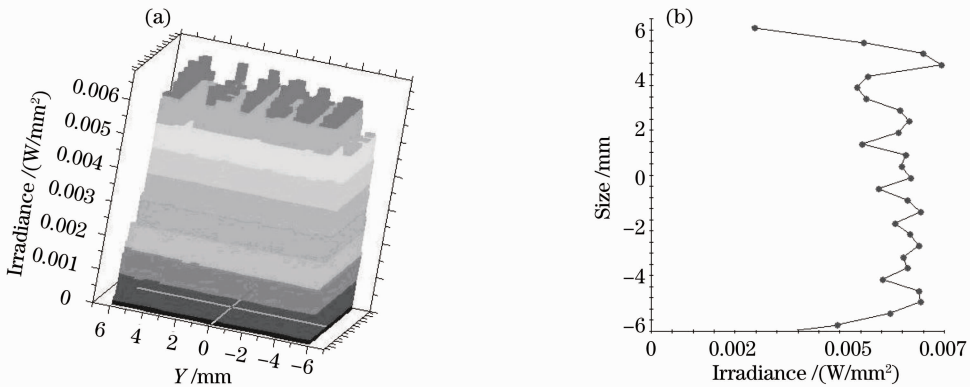


图 11 楔角为 0.05° 时的扩束单元出射光强分布。(a) 三维光强分布; (b) 光强分布曲线
Fig. 11 Intensity distributions as wedge angle is 0.05° . (a) Three-dimensional intensity distribution; (b) curve of intensity distribution

5 结 论

本文对提高深紫外光刻机照明系统扩束单元出射光束均匀性的方法进行了研究. 在分析了出射子光束之间叠加尺寸与反射镜透射率之间的关系后, 提出了非平行反射镜扩束镜组, 并推导出楔角与出射子光束个数的关系式, 该公式适用于任意有光束叠加要求的反射式扩束单元的设计. 仿真结果表明所设计扩束镜组在实现扩束的同时, 不仅减小了散斑效应, 还使出射光束均匀性由原来的 25% 提高到 11.86%. 除了光刻机, 目前准分子激光器还广泛应用于材料的冷加工和眼科治疗. 这些应用都需要先将激光光斑整形为正方形, 再进行匀光和聚焦. 具

有 Gaussian 光束特性的这一大类准分子激光光束都可以用本文提出的光束叠加方法实现扩束和提高光束均匀性.

参 考 文 献

- 1 K. Jain. Lithography and photoablation systems for microelectronics and optoelectronics: importance of laser beam shaping in system design[C]. SPIE, 2002, 4770: 1~12
- 2 Luo Xiangang, Chen Xu'nan, Yao Hanmin. Study of partial coherent imagery system in microlithography[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(12): 1703~1710
罗先刚, 陈旭南, 姚汉民. 微细光刻中部分相干系统成像研究[J]. 光学学报, 1998, 18(12): 1703~1710
- 3 G. Ogura, R. Andrew, R. D. Schaeffer. Practical consequences of matching real laser sources to target illumination requirements [C]. SPIE, 1996, 2703: 30~40

- 4 K. H. Lee, D. Kim, J. S. Kim *et al.*. Design of illumination system for ArF excimer laser step-and-scanner[C]. *SPIE*, 1998, **3334**: 997~1004
- 5 V. P. Veiko, A. T. shakola, E. B. Jakovlev *et al.*. Aspherization of cylindrical lenses by laser irradiation[C]. *SPIE*, 1996, **2687**: 156~166
- 6 Shang Jianli, Zhu Xiao, Chen Peng *et al.*. Refractive optical reshaper that converts a laser Gaussian beam to a flat-top beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2543~2549
尚建力, 朱 晓, 陈 鹏等. 一种折射式激光高斯光束平顶整形器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2543~2549
- 7 A. Goto. Diffractive Optical Element, Refractive Optical Element, Illuminating Optical Apparatus, Exposure Apparatus and Exposure Method [P]. US Patent, 2003 0227684A1, Dec. 11, 2003
- 8 Song Zhitang, Sheng Baoli, Li Guohua *et al.*. New design of bireflective parallel distensible beam splitting polarization prism [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1428~1432
宋致堂, 盛宝立, 李国华等. 双反射平行扩束偏光镜新设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1428~1432
- 9 Zhao Yang, Gong Yan, Zhang Wei. Design of beam expanding unit for illumination system of DUV lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1122004
赵 阳, 巩 岩, 张 巍. 深紫外光刻照明系统扩束单元设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1122004
- 10 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi *et al.* Transl. 3rd edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 143~145
古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克诚, 刘培森, 陈家璧等译. 第三版. 北京: 电子工业出版社, 2006. 143~145
- 11 S. Saito, H. Inoue, H. Nagano *et al.*. High durable 4-kHz ArF excimer laser G42A for sub-90-nm lithography[C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 1727~1734
- 12 Jiang Yanbing, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al.*. Beam shaping method for uniform illumination by superposition of multi-tilted Gaussian beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1012~1017
姜燕冰, 严惠民, 张秀达等. 基于倾斜多高斯光束叠加的均匀化照明整形方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1012~1017

栏目编辑: 韩 峰