第 31 卷 第 11 期
2011 年 11 月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 31, No. 11
November, 2011

深紫外光刻照明系统扩束单元设计

赵 阳 巩 岩 张 巍

(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 的投影光刻机中,准分子激光光源发出的矩形截面光束,需要进行一维扩束,以获得光束整形单元所需的正方形截面分布。现有的这类扩束单元分别存在严重的相干散斑效应和严格的装调公差等不足。基于此,提出了多组元平行反射扩束镜组。通过求解各组元透射率值的线性方程组,得到若干种扩束单元结构,其中的四组元扩束单元每个组元只有一种透射率,有效降低了镀膜的工艺成本。分别从公差分析、系统透射率和出射光束均匀性等方面对各类扩束单元结构进行综合比较,并通过建模仿真,验证了设计的四组元扩束单元的散斑效应和装调公差灵敏度都明显降低,而且出射光束较均匀,有利于提高照明均匀性。

关键词 几何光学;照明系统设计;一维扩束单元;公差分析;准分子激光光源;单一透射率;时间相干性

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1122004

Design of Beam Expanding Unit for Illumination System of DUV Lithography

Zhao Yang Gong Yan Zhang Wei

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

Abstract The excimer laser beam is needed to be expanded in one dimension to meet the requirement of square cross-section distribution for beam shaping unit, because of the rectangular cross-section distribution characteristic of laser source for projected lithography which holds 90 nm exposure linewidth. The reported beam expanding units have the deficiencies of serious speckle effect of coherence and the strict tolerance to alignment. A kind of multi-component parallel reflective expander is proposed aiming at the shortages above. The structures of such beam expanding units are determined by calculating linear equation set. One of the structures, which is called four-component beam expanding unit, has only one transmissivity to reduce the cost of coating. A synthesis comparison is executed at the aspects of tolerance analysis, transmission efficiencies and uniformities of output beam. According to the simulation results, the designed four-component beam expanding unit is proven to be an optimal scheme by the evident reduction in speckle effect and tolerance sensitivity. Meanwhile, the homogeneity of output beam is improved, which is favorable to enhance the uniformity of the whole illumination system.

Key words geometric optics; illumination-system design; one-dimensional beam expanding unit; tolerance analysis; excimer laser source; single transmissivity; temporal coherence

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、65、45 乃至 32 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,以提高光刻系统分辨率和增大焦深[1,2]。照明系统主要由扩束单元、光束传输单元、能量监测和控制单元、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。

本文的研究对象是曝光线宽为 90 nm 的投影

收稿日期: 2011-04-21; **收到修改稿日期:** 2011-05-19

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

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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整形效率，要求入射其上的光束截面为正方形，因此首先要用一维扩束单元将激光光束调整为正方形对称截面。可以分别采用物理光学或几何光学方法设计扩束单元。前者使用衍射元件，能够精确控制光束分布[3~5]；后者使用折射或反射光学元件，相对于前者，加工难度明显降低[6,7]。因此本文用几何光学方法对扩束单元进行设计与讨论。基于该方法的常用一维扩束单元的结构形式主要有两种：透射式柱面镜组和反射式渐变透射率板。柱面镜组的优点是可以实现任意扩束比，结构简单，装调容易；但这种扩束结构不仅不能削弱光源的时间相干特性，反而增加了空间相干性，以致扩束后的光束在经过匀光单元叠加时会发生干涉，产生散斑效应，影响照明系统均匀性[8]。渐变透射率板则通过减小时间相干性而削弱了散斑效应，但其结构复杂，对镀膜和装调提出了严格的要求，增加了成本。

基于上述两种结构的不足，本文将渐变透射率板分解并沿纵向延伸，设计了多组元平行反射扩束镜组结构。将每个组元的透射率用矩阵元素的形式表示，建立线性方程组，用待定系数法求解各组元的透射率，理论计算得到两种合理的扩束单元结构形式。通过对各种扩束单元的公差灵敏度、系统效率、输出光束均匀性等方面的比较选择最佳结构。仿真实验结果表明，设计的四组元扩束镜组的出射光束均匀性为 30%，有效地降低了照明光束的干涉散斑效应，同时装调难度明显减小。

2　深紫外光刻照明光源扩束方法

照明系统扩束单元的输入、输出光束截面之所以要求是矩形和正方形，是由光刻系统分辨力决定的。分辨力 R 可由瑞利公式表示为[9]

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \tag{1}$$

式中 k_1 是工艺因子，λ 是曝光波长，NA 是投影物镜像方数值孔径。由(1)式可知 λ 越短，分辨力越高，使用波长为 193 nm 的深紫外波段准分子激光足以满足 90 nm 光刻分辨力的要求[10]。选用 Gigaphoton 公司的 GT40A 型 ArF 准分子激光器[11]，光束截面如图 1 所示，尺寸为 12 mm×2 mm，可知所需的扩束倍率为 6。X 方向光强近似为高斯分布，Y 方向光强近似为平顶分布，对应发散角为2.5 mrad×1.5 mrad。光源中心波长为193.368 nm，带宽为 0.7 pm。

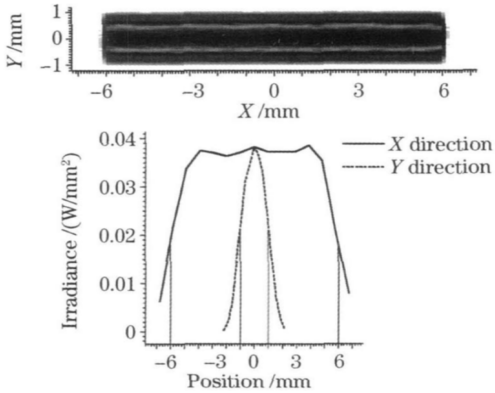


图 1　准分子激光光源截面光强分布

Fig. 1　Intensity distributions of excimer laser source at X and Y directions

此外，增大 NA 也可以提高分辨率，但焦深却因此减小。为了在满足分辨力要求的同时增大焦深，发展了离轴照明技术。光束整形单元能够实现离轴照明模式，同时要求该单元的入射光束截面为正方形[12]。

一种是柱面镜组扩束单元[13,14]原理如图 2 所示。该单元由负-正光焦度柱面镜组组成。镜组的共轴结构使得装调简便。根据光学扩展量定义[15]，当光束口径增大时其发散角减小，根据空间相干长度 X_s 和发散角 θ 的反比例关系

$$X_s = \frac{2\lambda}{\theta}, \tag{2}$$

可知扩束的结果增加了出射光束的空间相干性。同时由于光源带宽窄，增加了光束的时间相干性。这两种相干性使照明光束在经过匀光单元叠加时产生明显的干涉散斑效应。

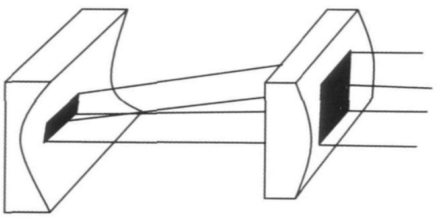


图 2　柱面镜组扩束单元

Fig. 2　Cylindrical lens beam expanding unit

文献[16]提出采用渐变透射率板实现一维扩束，同时减少散斑效应，原理如图 3 所示。M_1 为全反射镜，M_2 为渐变透射率板，“渐变透射率”的含义是 M_2 上光线顺序照射的不同子单元(如 a，b)的透射率值呈阶梯状依次递减。M_1 和 M_2 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

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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 M_1 全部反射到 M_2 上的 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 M_1、M_2 之间依次传播，各相邻出射子光束拼接实现一维扩束。设定 M_1 和 M_2 之间的距离大于光束相干长度的一半，即各出射子光束之间没有时间相干性。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，因此有效地减小了干涉散斑效应。

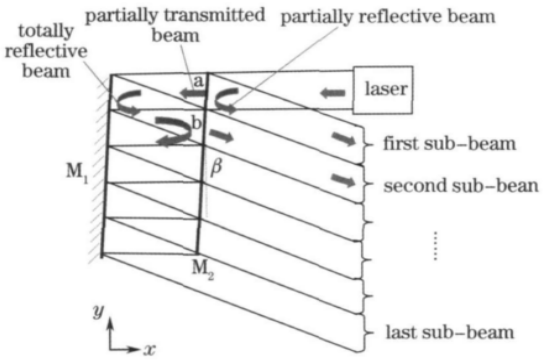


图 3　渐变透射率板扩束单元

Fig. 3　Graded transmissivity-plates beam expanding unit

这种扩束单元的不足体现在加工和装调方面：为使各出射子光束光强一致，需要在 a、b 等子单元表面镀不同透射率膜层。镀膜方法有两种：一种是采用蒸汽沉积的方法在 M_2 整块板上镀不同透射率的膜层[17,18]，这种工艺对镀膜区域的位置精度要求高，耗时长，成本也大大增加。另一种方法是将 M_2 拆分成各子单元，分别镀膜，再拼接成 M_2，这样简化了镀膜工艺，却增加了拼接装调的工作量。这两种方法实现起来都有一定难度。

3　多组元平行反射扩束镜组设计

为了降低渐变透射率板镀膜和拼接装调的难度，提出了多组元平行反射扩束镜组。图 4 为该镜组的设计原理图，其基本设计思想是在上述渐变透射率板结构的基础上，新增加若干个对光束既反射又透射的组元，并沿 X 方向平行排列，如图 4 中的 M_3、M_4。为方便讨论，规定从光束入射方向将第 i 个组元对应为矩阵的第 i 行（$1\leqslant i\leqslant I$），将光束在每个组元上的照射区域划分成 J 个子单元，每个照射区域称为一个单元，设第 i 行第 j 单元的透射率为 τ_{ij}（$1\leqslant j\leqslant J$）。与渐变透射率板相比，该装置由于同时利用各组元的反射和透射，即一种透射率在透射（τ_{ij}）和反射（$1-\tau_{ij}$）时使用了两次，因此增加了同一种透射率的利用率，可以减小不同透射率膜层的数量。

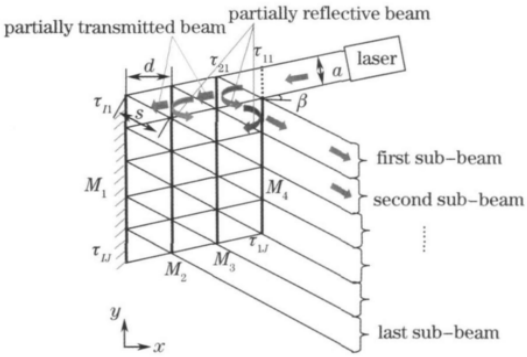


图 4　多组元平行反射扩束单元

Fig. 4　Multi-components parallel reflective beam expanding unit

3.1　各组元间隔计算

各组元的间隔是由时间相干长度决定的。时间相干长度计算公式为

$$l=\frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta\lambda}, \tag{3}$$

式中 $\bar{\lambda}$ 为平均波长，经加权计算后等于中心波长；$\Delta\lambda$ 为带宽。由(3)式计算得 $l=53.4$ mm，设计时必须保证两个相邻出射光束的光程差大于 l。

设各组元间隔相同且由 d 表示，入射光束与 X 方向夹角为 β，入射光束口径为 a。由几何关系可知

$$d=\frac{a}{2\sin\beta}. \tag{4}$$

光束经过两个组元产生的光程差 e 为

$$e=2s=\frac{2d}{\cos\beta}. \tag{5}$$

已知 $a=2$ mm，$e\geqslant l$，将(4)式、(5)式联立，得到关于 d 的一元四次方程，舍去负值解，求得 $d\geqslant 26.68$ mm。注意 d 不可取得过大，否则会使倾角很小，增加了对调整精度的要求。取整 $d=30$ mm，求得 $\beta=1.91°$。

3.2　各组元透射率计算

设入射光束光强为 1，为计算方便，先不考虑介质吸收等光能损失，则 6 束出射光每束强度为 1/6。为了满足每个组元仅有一种透射率的约束条件，应令 τ_{11} 为 1，否则 τ_{11} 恒等于 5/6，此时在上述约束条件下方程组无解。为了不失一般性，也为了后面讨论放宽约束条件时求解方程组的需要，仍将 τ_{11} 作为变量，在图 4 中用虚线标出。参考图 4 得出 $I=4$ 时求解各子单元透射率的方程组：

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\begin{cases}\tau_{11}(1-\tau_{21})\tau_{12}=\dfrac{1}{6}\\ \tau_{11}\tau_{21}(1-\tau_{31})\tau_{22}\tau_{13}=\dfrac{1}{6}\\ \tau_{11}(1-\tau_{21})(1-\tau_{12})\tau_{22}(1-\tau_{32})\tau_{23}\tau_{14}=\dfrac{1}{6}\\ \tau_{11}\tau_{21}(1-\tau_{31})\tau_{22}(1-\tau_{13})\tau_{23}(1-\tau_{33})\tau_{24}\tau_{15}=\dfrac{1}{6}\\ \tau_{11}(1-\tau_{21})(1-\tau_{12})\tau_{22}(1-\tau_{32})\tau_{23}(1-\tau_{14})\tau_{24}(1-\tau_{34})\tau_{25}\tau_{16}=\dfrac{1}{6}\\ \tau_{11}\tau_{21}(1-\tau_{31})\tau_{22}(1-\tau_{13})\tau_{23}(1-\tau_{33})\tau_{24}(1-\tau_{15})\tau_{25}(1-\tau_{35})\tau_{26}\tau_{17}=\dfrac{1}{6}\end{cases},\tag{6}$$

式中的第一个等式表示入射光束透过 M_4 的第一个子单元(τ_{11}),然后在 M_3 上反射($1-\tau_{21}$),反射光再经过 M_4 第二子单元透射(τ_{12}),即得出第一个出射子光束的能量计算表达式,它等于 1/6。其他等式依次类推。I 取其他值的情况在后面讨论。值得一提的是,在得到(6)式的过程中,如果考虑所有组元上的每个照射区域对光束传播的透射、反射的情况,那么方程组将是异常庞大和复杂的,而且没有特定的规律,求解起来会很繁杂。因此暂不考虑每个出射子光束是由所有可能产生的出射光束的组合的情况,只是取其中的一种可能情况列出了方程组。从后面解出的结果来看,这种简化的计算方法是可行的,得到了简单的扩束单元结构。

下面根据(6)式讨论各组元透射率值与组元个数的关系。设 $\tau_{1m}=x,m=2,3,\cdots;\tau_{2n}=y,n=1,2,\cdots;\tau_{3k}=z,k=1,2,\cdots$;最后一个组元为全反射面,即 $\tau_{4t}=0,t=1,2,\cdots$。解(6)式得 $\tau_{1m}=1/2,m=2,3,4;\tau_{2n}=2/3,n=1;\tau_{3k}=1/2,k=1$,结构如图 5 所示。此结构被称为四组元扩束单元。

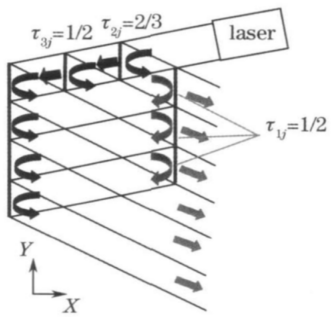


图 5　四组元扩束单元

Fig. 5　Four-component beam expanding unit

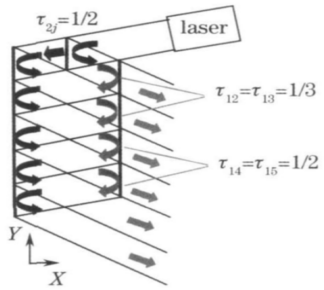


图 6　三组元扩束单元

Fig. 6　Three-component beam expanding unit

当 I 取 5 时,由(6)式计算得每个组元也仅有一种透射率,但 5 个组元使 X 方向尺寸增大,因此 $I\geqslant 5$ 时得不到最优解。

当 I 取 3 时,若仍要求每个组元仅有一种透射率,则(6)式无解。考虑到此时扩束单元具有 X 方向空间尺寸减小的优点,放宽对单一透射率的约束,解得:$\tau_{1m}=1/3,m=2,3;\tau_{1m}=1/2,m=4,5;\tau_{2n}=1/2,n=1;\tau_{3k}=0,k=1,2,\cdots$,即第一组元的 4 个子单元有 2 种透射率。该结构如图 6 所示,称为三组元扩束单元。

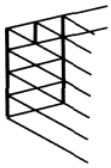
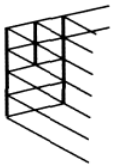
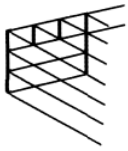
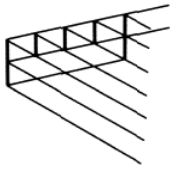
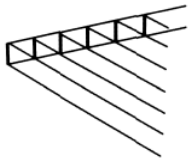
当放宽单组元透射率一致的要求时,τ_{11} 不必为 1,此时通过方程组解得的扩束单元结构系列如表 1 所示。通过比较可知,三组元扩束单元与 A_3 等同;四组元扩束单元比 A_4 使用的透射率种类少,而且前者的各组元仅有单一透射率;A_5、A_6 空间尺寸增加,组元数量也增多,不是很好的方案。当 I 取 2 时,即为渐变透射率板,这里不再讨论。

综上,从解出的各种结构中选择四组元和三组元扩束单元这两种较合理的方案。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　多组元扩束单元解的结构及参数

Table 1　Structures and parameters of the solves of beam expanding unit

Value of I	3		4	5	6
Structure chart					
Symbol	A_3	—	A_4	A_5	A_6
Transmissivity	$\tau_{11}=5/6$; $\tau_{1m}=1/2$; $m=2,3,4$; $\tau_{21}=3/5$;	No solution	$\tau_{11}=5/6$; $\tau_{1m}=1/2$; $m=2,3$; $\tau_{21}=3/5$; $\tau_{31}=1/3$	$\tau_{11}=5/6$; $\tau_{1m}=1/2$; $\tau_{21}=3/5$; $\tau_{21}=2/3$; $\tau_{41}=1/2$	$\tau_{11}=5/6$; $\tau_{21}=4/5$; $\tau_{31}=3/4$; $\tau_{41}=2/3$; $\tau_{51}=1/2$
Number of sub-units	3	—	4	5	5
Size /mm^3	9×12×60	—	8×12×90	6×12×120	6×12×150

4　扩束单元性能比较

将柱面镜组、渐变透射率板与设计的三组元、四组元扩束单元的各项性能参数进行比较。首先，用 Code V 软件对 4 种结构进行公差分析，比较装调难易程度。扩束单元属于非成像光学范畴，它的理想化将使软件不能给出扩束单元公差分析的正确结果，因此要在出射端添加聚焦镜组，而不能加入理想透镜。以渐变透射率板扩束单元为例，其结构及调制传递函数（MTF）曲线如图 7 所示，最后一个出射光线含有通过各个子单元反射时对安装误差的累积，对其进行评价便可以获得装调公差信息。从 MTF 曲线可以看出矩形截面光束使得子午和弧矢方向（分别对应图 1 中 X 和 Y 方向）的评价标准不同。子午方向光束尺寸只有 2 mm，像质达到衍射极限；弧矢方向光束尺寸 12 mm，聚焦镜组的残余像差使其偏离衍射极限。各扩束单元使用相同的聚光镜组，其残余像差对各组元公差分析结果的比较影响不大。

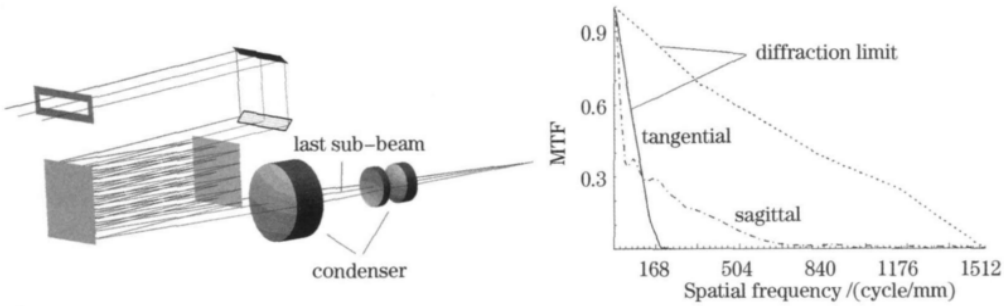


图 7　渐变透射率板模型及 MTF 曲线

Fig. 7　Graded transmissivity-plates model and MTF curves

将像面离焦和偏心作为补偿量，4 种扩束单元的公差分析结果如图 8 所示，这里仅考察弧矢方向，因为该方向光束尺寸大，公差敏感，更容易反映出公差的松紧程度。分析可知柱面镜组公差最宽松；四组元和三组元单元因结构和组元个数差别不大，装调难度接近；渐变透射率板由于子单元个数最多，因此装调公差很严格。

各组元基底均采用熔石英玻璃，在基底表面镀 LaF_3 和 MgF_2 膜系。设熔石英的吸收损耗为 1%[17~19]，在考虑材料的吸收损失时，后 3 种扩束单元的出射光强分布和理论值的比较如图 9 所示。在四组元单元中，第三个出射子光束经过基底材料的反射、透射次数多，能量吸收损失也较为严重，其他组元能量损失相对较少。此外，渐变透射率板的结构特点使各子单元出射光强度逐级递减。由图 10 可见，四组元扩束单元的各个子光束光强波动最小。

后三种扩束单元都考虑了削弱时间相干性的影响，因此散斑效应有效降低。柱面镜组在 X 方向尺

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

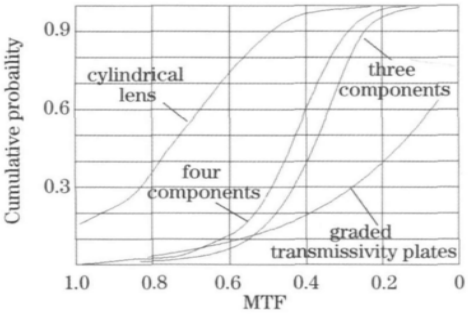


图 8　四种扩束单元公差分析曲线

Fig. 8　Tolerance curves of four kinds of beam expanding units

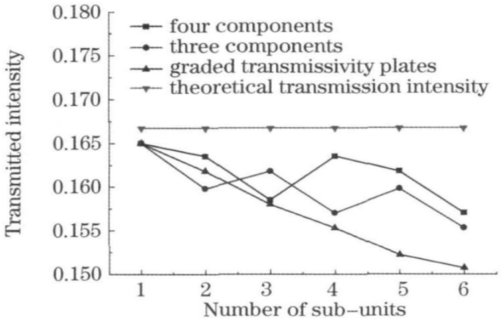


图 9　各子单元出射光束光强分布

Fig. 9　Emergent-beam intensity distributions of sub-units

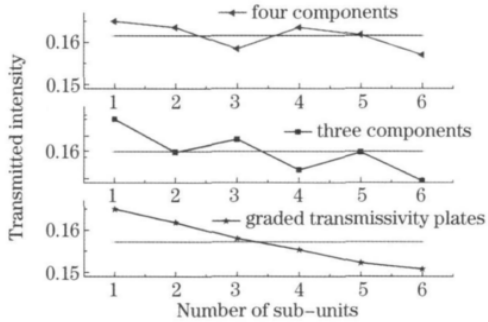


图 10　各子单元出射光束光强波动

Fig. 10　Emergent-beam intensity fluctuations of sub-units

寸最大；渐变透射率板尺寸最小；四组元单元为了减少镀膜和装调的难度，在 X 方向增大了空间的尺寸。各种扩束单元性能参数比较如表 2 所示，其中系统公差的数值是指公差导致的系统 MTF 的下降量；均匀性定义为

$$\eta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%. \tag{7}$$

综合分析比较结果可知，四组元扩束单元为最佳方案。

表 2　四种扩束单元性能比较

Table 2　Comparisons of four kinds of beam expanding units

	Cylindrical lens	Graded transmissivity plates	Four components	Three components
Number of sub-units	—	6	4	3
System tolerance	−0.5299	−0.9591	−0.7807	−0.8076
Total transmission /%	86.8	83.7	87.6	88.5
Uniformity η /%	67.7	25	22	30
Temporal coherence	Yes	No	No	No
Size /mm^3	12×12×135	12×12×30	8×12×90	10×12×60

5　仿真试验

用三维建模软件 Light Tools 分别对柱面镜组、渐变透射率板、四组元和三组元单元进行仿真分析，追迹 200000 条光线，结果如图 11 所示。

由图 11(a)可知柱面镜镜组扩束后均匀性较差，不利于获得高均匀性照明；其他 3 种扩束单元的扩束结果均匀性相对较好。

在建模时有意引入了两个光路折转反射镜 A 和 B，便于相邻子单元的出射光束部分叠加，以补偿图 1 中 X 方向高斯分布边缘能量下降而导致的扩束后光束不均匀的不足，提高整个照明系统的均匀性。由于相邻光束不存在时间相干性，即使边缘叠加散斑效应也很微弱，因此这种叠加方式是可行的。

6　结　　论

本文针对深紫外光刻机照明系统的扩束单元进行了结构设计与分析。在比较了用于该类型光刻设备的两种扩束单元的优缺点后提出了多组元平行反射镜扩束镜组。将求得的两种扩束单元与文献报道的扩束单元的各项性能指标进行比较，结果表明所设计的四组元扩束单元为最佳结构方案。这种列方程组求解结构的方法可以用于设计其他扩束比的一维扩束单元。此外，针对光源在一个方向上呈高斯分布的特点，可以考虑改变各组元之间的相对倾角和间隔，使各个子单元的出射光束边缘有部分重叠，进一步提高照明均匀性，这部分内容将在后续的研究工作中逐步展开。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

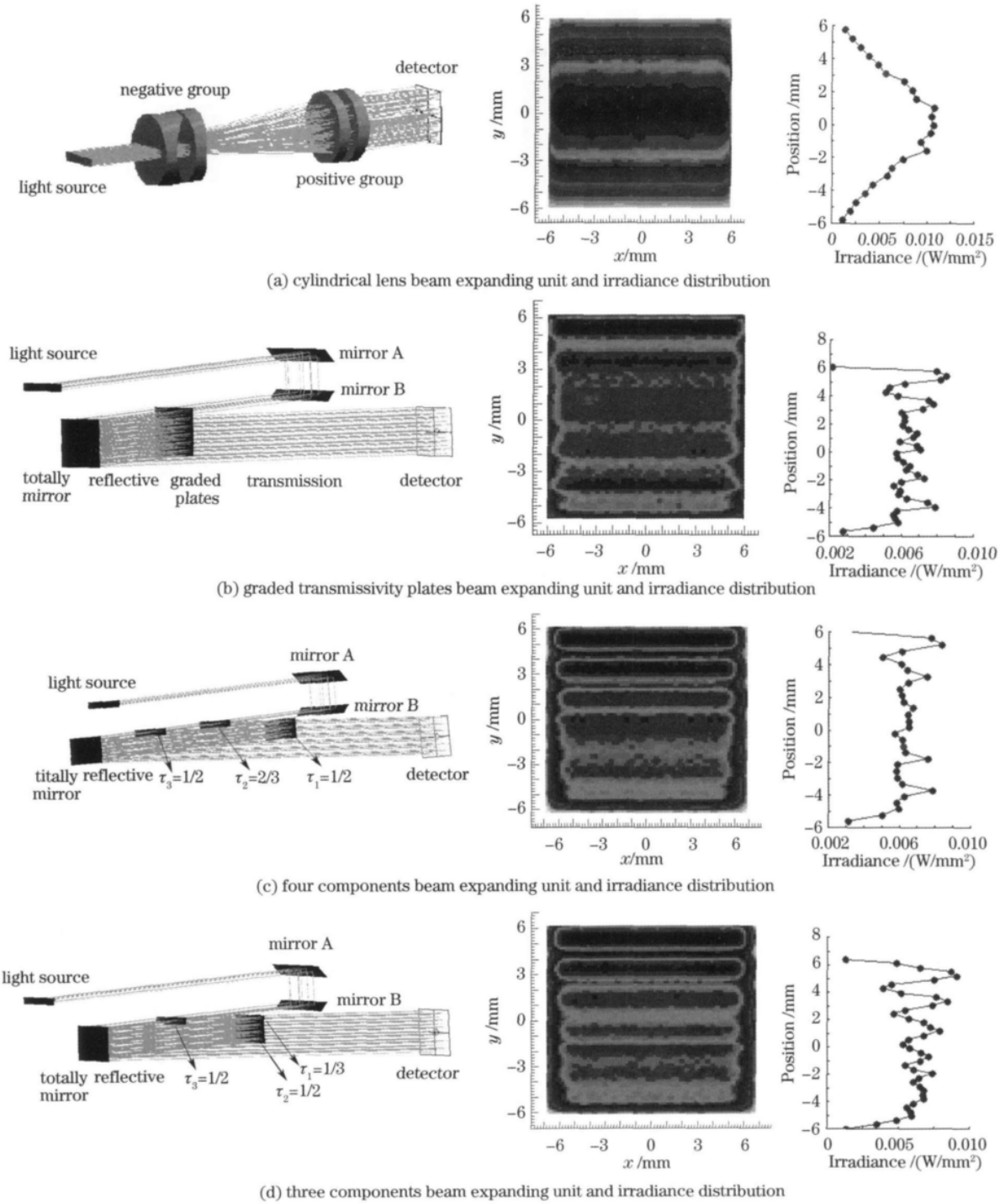


图 11　四种扩束单元仿真结果

Fig. 11　Simulation results of four kinds of beam expanding units

参　考　文　献

1 Kanti Jain. Lithography and photoablation systems for mircoelectronics 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 partical 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 Tasso R. M. Sales. Structured microlens arrays for beam shaping[C]. *SPIE*, 2003, **5175**: 109～120

4 Lin Yong, Hu Jiasheng, Wu Kenan. Algorithm for the design of diffractive optical elements for laser beam shaping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1682～1686

林　勇，胡家升，吴克难. 一种用于光束整形的衍射光学元件设计算法[J]. **光学学报**, 2007, **27**(9): 1682～1686

5 Jiang Yanbing, Yan Huimin, Zhang Xiuda *et al*.. Beam shaping method for uniform illumination by superposition of multi-tilted

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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

6 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

7 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

8 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi *et al*.. transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. 143～145
傅里叶光学导论(第三版)[M]. 秦克诚，刘培森，陈家璧 等 译. 北京：电子工业出版社，2006. 143～145

9 Burn J. Lin. Immersion lithography and its impact on semiconductor manufacturing[C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 46～67

10 Sara Loi, Umberto Iessi, Robert Chung. Analysis of the combined impact of the laser spectrum, illuminator miscalibrations, and lens aberrations on the 90 nm technology node imaging with off axis illuminations [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 615434

11 Takashi S., Hirotoshi Inoue, Hitoshi Nagano *et al*.. High durable 4-kHz ArF excimer laser G42A for sub-90-nm lighography[C]. *SPIE*, 2004, **5377**: 1727～1734

12 Glenn Ogura, Rod Andrew. Practical consequences of matching real laser sources to target illumination requirements[C]. *SPIE*, 1996, **2703**: 30～40

13 Kag Hyeon Lee, Doh Hoon Kim, Jong Soo Kim *et al*.. Design of illumination system for ArF excimer laser step-and-scanner[C]. *SPIE*, 1998, **3334**: 997～1004

14 V. P. Veiko, A. T. Shakola, E. B. Jakovelv *et al*.. Aspherization of cylindrical lenses by laser irradiation[C]. *SPIE*, 1996, **2687**: 156～166

15 Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu *et al*.. Design for LED uniform illumination reflector based on étendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2297～2301
余桂英，金　骥，倪晓武 等. 基于光学扩展量的 LED 均匀照明反射器的设计[J]. 光学学报，2009，**29**(8)：2297～2301

16 Johannes Wangler. Arrangement for Shaping a Laser Beam and for Reducing the Coherence Thereof [P]. US Patent, 1994, 5343489

17 Shang Shuzhen, Shao Jianda, Fan Zhengxiu *et al*.. The study of ultraviolet properities of resistant-boat evaporated LaF_3 films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1941～1945
尚淑珍，邵建达，范正修 等. 热舟蒸发 LaF_3 薄膜的紫外性能研究[J]. 物理学报，2008，**57**(3)：1941～1945

18 Shang Shuzhen, Shao Jianda, Fam Zhengxiu. Low-loss 193 nm anti-reflection coatings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1946～1950
尚淑珍，邵建达，范正修. 低损耗 193 nm **增透膜[J]. 物理学报**，2008，**57**(3)：1946～1950

19 Huang Wenjing, Luo Hailu, Wen Shuangchun. Angular shift of Gaussian beams at metamaterial interfaces [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3311～3316
黄文静，罗海陆，文双春. 高斯光束在超常材料界面的反射光束角移研究[J]. 光学学报，2010，**30**(11)：3311～3316

栏目编辑：韩　峰

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net