

积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用

郭立萍^{1,2} 黄惠杰¹ 王向朝¹

(1 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学实验室, 上海 201800)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 从几何光学角度讨论了积分棒的匀光原理, 介绍了积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用. 分析了积分棒入射光束的数值孔径对刀口狭缝面上光强分布的影响, 得到了积分棒尺寸与刀口狭缝面上照明视场的关系, 为步进扫描投影光刻系统中积分棒的设计提供了依据.

关键词 光刻; 照明均匀性; 非序列光学元件; 积分棒

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A

0 引言

在微细加工领域, 光学投影光刻技术仍在不断发展, 目前乃至今后一段时间内仍占主导地位^[1~3]. 曝光系统是投影光刻机中的核心部分, 其成像性能直接决定了光刻分辨率. 曝光系统包含照明系统和投影物镜两个子系统. 照明系统作为曝光系统的一个主要组成部分, 其性能的优劣直接关系到曝光系统整个视场中的(Critical Dimension, 简称 CD)均匀性, 也就决定了芯片的质量与成品率; 另外, 照明系统的性能直接关系到整个系统的透过率, 从而决定了光刻机的生产效率. 随着光刻分辨率不断提高, 曝光系统对照明均匀性的要求越来越高, 而一般光源不能满足照明均匀性的要求. 为了提高照明均匀性, 人们研究开发了多种光学匀光器, 如蝇眼透镜、非球面透镜组和积分棒等^[4~8]. 其中积分棒具有结构简单、造价低廉、易于装调、匀光效果理想、透过率高等优点. 而且, 在步进扫描投影光刻系统中, 为降低掩模台与硅片台的扫描运动误差对曝光剂量均匀性的影响, 提高 CD 均匀性, 通常将照明视场中扫描方向上的光强分布设计为梯形. 实现光强梯形分布的一个简单的方法就是使积分棒出射端面与其后的刀口狭缝不重合^[9,10].

基于上述优点, 积分棒在光刻系统中得到了广泛应用. 本文从几何光学角度分析了积分棒的匀光原理, 介绍了积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用, 模拟分析了照明视场的光强分布, 为步进扫描投影光刻系统中积分棒的设计提供了依据. 最后给出了积分棒的设计方法与设计实例.

1 积分棒的匀光原理及其在步进扫描投影光刻系统中的应用

积分棒的工作原理如图 1. 在步进扫描投影光刻系统中积分棒是一个截面为矩形的玻璃棒. 激光束通过聚焦透镜聚焦于积分棒的入射端面中心, 经过积分棒内壁的多次全反射, 最后在积分棒的出射端面迭加而形成均匀照明面. 积分棒的出射端面通过照明镜组成像于被照明物体(掩模版)上, 从而使物体得到均匀照明. 由于积分棒的反射转折, 入射光束被分割成若干小区域, 对照明镜组而言, 这些小区域等效于发光孔径不等, 位于积分棒入射端面的若干虚点光源(如图 1 中的 S_0 、 S_1 等), 这样相应于各小区域在照明镜组的像方对应位置都有一个相应的像点(如图 1 中的 P_1 、 P_2 等), 每一个像点均代表入射光束的一个区域. 对于来自积分棒入射端面任何一点的光束都会被积分棒分割成许多细光束, 亦即在同一平面上形成许多虚点光源, 每一虚点光源所代表的光束都均匀投射到掩模版上的相同区域, 它们的迭加导致掩模版上的照明光强基本上处处相等. 在实际应用中, 为了进一步提高照明均匀性, 通常在聚焦透镜前焦面放置一个衍射光学元件(DOE). DOE 不仅提高了积分棒的匀光效果, 还能避免光束在积分棒入射端面会聚于一点对入射端面的热损伤.

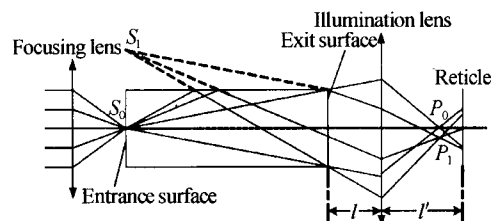


图 1 积分棒工作原理

Fig. 1 Schematic illustration of an integrator rod

照明系统与成像系统的评价方法是不同的,它不是以系统的(Optical Transfer Function,简称OTF)作为评价指标,而是以照明均匀性作为评价指标,其计算公式为

$$Uniformity = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \quad (1)$$

式中 I_{max} 与 I_{min} 分别为照明视场中的最大与最小光强. 对于 DUV 投影光刻系统,一般要求照明均匀性必须优于 2%.

图 2 为曝光系统示意图. 相对于照明镜组,刀口狭缝与掩模版是物像共轭关系. 在步进扫描投影光刻系统中,由于积分棒的出射端面与刀口狭缝不重合,在刀口狭缝表面的照明视场内,沿 X、Y 方向都得到梯形光强分布.

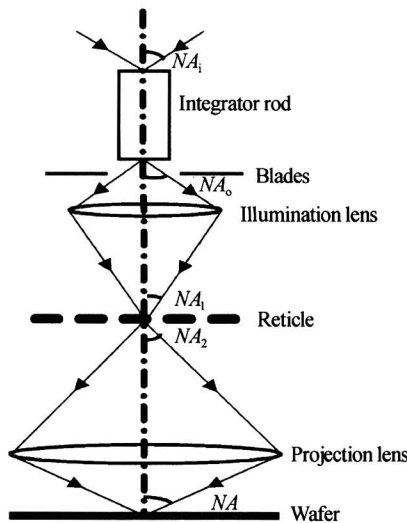


图 2 曝光系统
Fig. 2 Schematic illustration of exposure system

图 2 中 NA_i 为积分棒入射光束的数值孔径; NA_o 为照明镜组物方数值孔径; NA_1 为照明镜组像方数值孔径; NA_2 为投影物镜物方数值孔径; NA 为投影物镜像方数值孔径. 照明镜组(illumination lens)与投影物镜(projection lens)的放大倍率分别为 M_1 与 M_2 , 根据拉氏不变量,可以得到

$NA_2 = |M_1| \times NA, NA_1 = \sigma \times NA_2, NA_o = |M_2| \times NA_1$, 设 M_1 与 M_2 分别为 $-4 \times$ 与 $-1/4 \times$, 可得

$$NA_i = \sigma \times NA \quad (2)$$

假设投影物镜的数值孔径 NA 的变化范围为 $0.5 \sim 0.75$, 照明系统的部分相干因子 σ 的变化范围为 $0.31 \sim 0.88$, 由式(2)可以计算出积分棒入射光束的最大 $NA_{i,max}$ 与最小数值孔径 $NA_{i,min}$ 分别为 0.66 和 0.155 .

由于刀口狭缝与掩模面分别为照明镜组的物面和像面,如果刀口狭缝面的梯形光强分布完全成像到掩模面,在掩模面沿 X 与 Y 方向也将得到梯形光强分布. 为提高曝光剂量均匀性,仅希望在扫描方

向上(Y向)的光强分布为梯形,而在 X 方向上需要均匀的光强分布. 为实现此要求, X、Y 方向的刀口需要特别考虑,图 7 给出积分棒与刀口狭缝的位置示意图, X、Y 方向的刀口处于同一平面内,为了在 X 方向得到均匀的光强分布,需要 X 方向的刀口遮挡住梯形光强分布的斜边部分,刀口狭缝前后的光强分布分别如图 3.

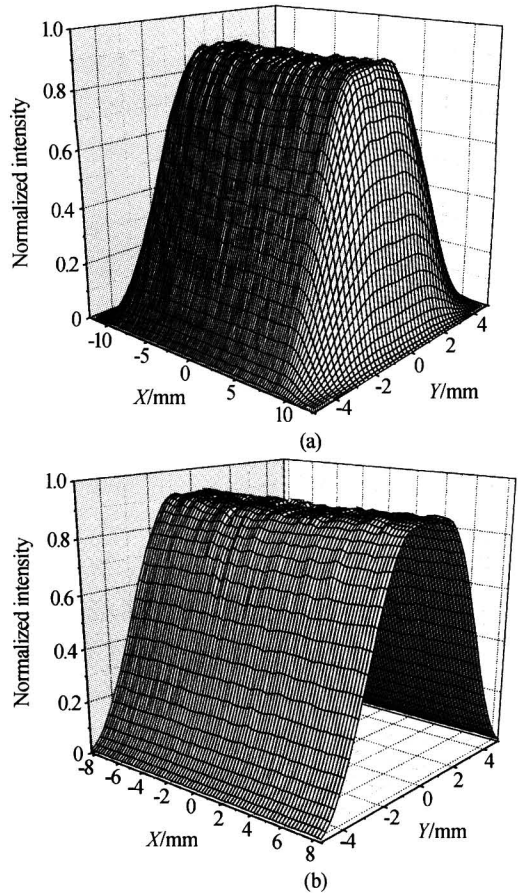


图 3 (a)刀口狭缝前的光强分布;(b)刀口狭缝后的光强分布
Fig. 3 (a)Intensity profile in front surface of the blades;
(b)Intensity profile in back surface of the blades

2 计算分析与设计方法

2.1 积分棒匀光效果的模拟分析

利用 Zemax 软件对积分棒的匀光效果进行模拟分析,如图 4,具体模拟条件见表 1. 模拟分析中仅考虑相干照明情况,实际投影曝光中应用的部分相干光源是点光源的扩展,因此,所得结论对部分相干光同样适用.

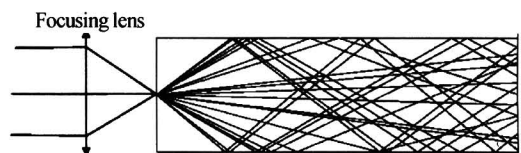


图 4 模拟光路图
Fig. 4 Layout of simulation

表 1 Zemax 模拟计算的参量设置

波长/nm	193
积分棒的材料	熔石英
积分棒的横截面尺寸 mm×mm	25×5.5
入射光束的数值孔径	$\pi/4$
出射端面上计算选取的像素数	250×55
计算分析的光线数	1×10^7

图 5 给出了积分棒出射端面照明均匀性与其长度的关系. 显然,在积分棒横截面一定的情况下,积分棒越长,积分棒的匀光效果就越好,这是因为虚点光源的个数与积分棒长度成正比. 在用 Zemax 模拟过程中,为了得到较为精确的计算结果,需要追迹大量的光线,上述的模拟计算所追迹的光线数为 10^7 . 光线在积分棒内以全反射方式传播,反射损耗可以不计,积分棒内的能量损耗主要是由材料吸收引起的. 积分棒越长,均匀效果越好,但光能损耗也就随之增加,因而,在追求高均匀性的同时也要兼顾透过率.

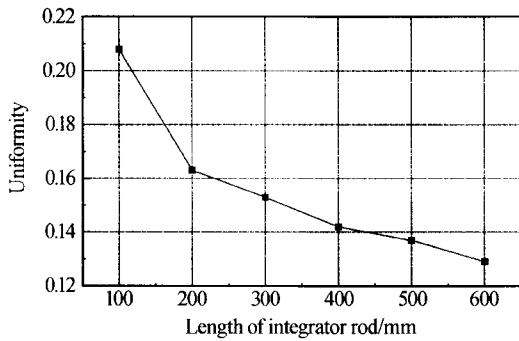


图 5 积分棒长度对均匀性的影响
Fig. 5 Uniformity vs. length of integrator rod

2.2 光束入射数值孔径对光强分布的影响

设积分棒的尺寸为 $25 \text{ mm} \times 5.5 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 积分棒出射端面与刀口狭缝的间距 $defocus = 1.89 \text{ mm}$, 在 NA_i 为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.66 的情况下, 模拟计算刀口狭缝面上的光强分布. X、Y 轴上的光强分布如图 6. 表 2 给出了 Y 轴上光强梯形分布的尺寸.

图 6 与表 2 给出的模拟计算结果说明,随着积分棒入射光束数值孔径的增大,梯形光强分布的底边增大,顶边减小;但梯形的等效宽度不变,都等于积分棒截面的宽度. 照明均匀性随着数值孔径的增大而提高,这是因为数值孔径越大,光线在积分棒内的反射次数越多. 由表 2 给出的计算就结果可知,均匀性的最大值为 1.22%, 满足系统小于 2% 的要求. 由式(2)可知,积分棒的入射光束数值孔径是投影物镜的数值孔径与照明系统的部分相干因子的乘积,投影物镜数值孔径 NA 与部分相干因子 σ 变化

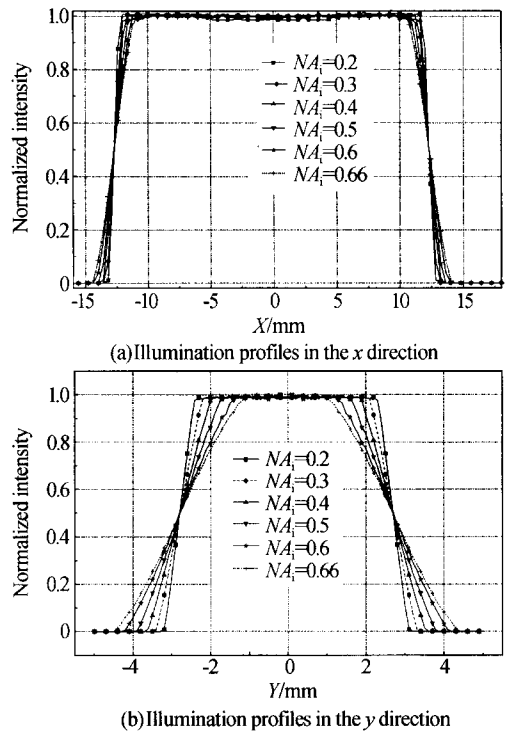


图 6 不同 NA 下狭缝表面光强的梯形分布
Fig. 6 Trapezoidal illumination profiles at different NA

表 2 Y 轴上梯形光强分布尺寸与照明均匀性

数值孔径	顶部宽度 /mm	底部宽度 /mm	有效宽度 /mm	梯形顶部的均匀性/(%)
0.2	4.6	6.4	5.5	1.22
0.3	4.2	6.8	5.5	1.18
0.4	3.8	7.2	5.5	1.12
0.5	3.2	7.8	5.5	1.07
0.6	2.8	8.2	5.5	1.05
0.66	2.2	8.8	5.5	0.99

会引起光强分布的变化. 因此,在投影曝光系统中,积分棒的结构参量必须根据曝光系统的要求进行确定. 这为步进扫描投影光刻系统中积分棒的设计提供了依据.

2.3 积分棒的设计

为满足投影物镜最大视场为 $20 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$ 与硅片表面照明视场 Y 方向等效宽度为 5.5 mm 的要求,下面分析积分棒的设计. 考虑到照明镜组与投影物镜的放大倍率分别为 M_1 与 M_2 , 积分棒横截面的宽度 w 与硅片表面照明视场的等效宽度 s_{eff} 满足

$$s_{eff} = w \times |M_1| \times |M_2| \tag{3}$$

设 M_1 与 M_2 分别为 $-4 \times$ 与 $-1/4 \times$, 由式(3)可知,刀口狭缝的最大面积应该与投影物镜的最大视场面积相等,也是 $20 \text{ mm} \times 8.8 \text{ mm}$. 由 2.2 中的分析可知,积分棒的 Y 向宽度必须等于照明视场的等效宽度,即为 5.5 mm.

根据图 7(a)的几何关系,积分棒出射端面与刀口狭缝的间距 $defocus$ 可由式(4)计算

$$defocus = \frac{(y-w)/2}{\tan[\arcsin(NA_{\max})]} \quad (4)$$

式中 y 与 w 分别为刀口狭缝与积分棒横截面的 Y 向宽度, 其值分别为 8.8 mm 和 5.5 mm, 由此计算 $defocus$ 为 1.87816 mm. 要实现 X 方向 20 mm 范围内的均匀照明, 积分棒横截面 X 方向宽度 x 应满足

$$x - 20 \geq defocus \times \tan[\arcsin(NA_{\max})] \times 2 \quad (5)$$

由此可得

$$x \geq 23.3 \text{ mm}$$

取 $x = 25$ mm. 把积分棒的截面尺寸设计为 25 mm × 5.5 mm, 在 $defocus$ 为 1.87816 mm 的情况下, 能够满足系统最大投影物镜视场为 20 mm × 8.8 mm 的要求. 积分棒的结构及其实现的光强分布, 如图 7.

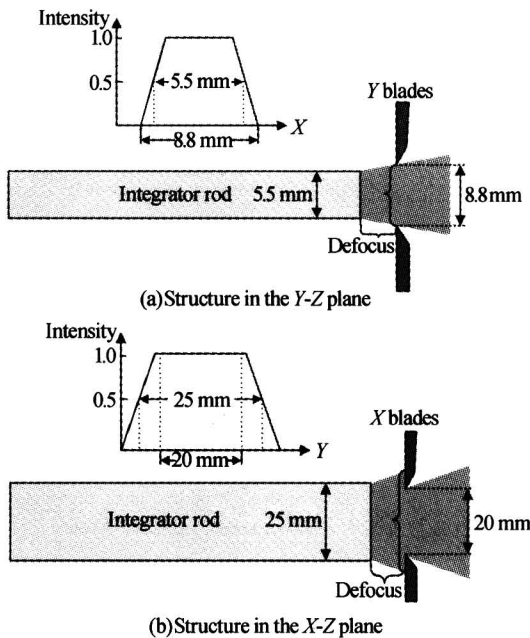


图 7 积分棒与刀口狭缝的结构及刀口狭缝表面的光强分布
Fig. 7 Structure of the integrator rod and blades with the illumination profiles at surface of the blades

3 结论

从几何光学角度分析了积分棒的匀光原理, 介绍了积分棒在步进扫描投影光刻系统中的应用. 利用 Zemax 软件对积分棒的匀光效果进行了计算, 结果表明, 积分棒的匀光效果随着其长度的增加而提高, 但是光能损耗随之增加. 因而, 在追求高均匀性的同时也要兼顾透过率. 讨论了积分棒入射光束的数值孔径对刀口狭缝平面上光强分布的影响, 得到了积分棒尺寸与刀口狭缝平面上照明视场的关系, 并计算了不同数值孔径下的照明均匀性. 为步进扫

描投影光刻系统中积分棒的设计提供了依据. 最后提出了积分棒的设计方法, 根据系统的要求, 设计了积分棒的截面尺寸, 在 $defocus = 1.87816$ mm 时, 满足系统最大投影物镜视场为 20 mm × 8.8 mm 的要求.

参考文献

- 1 罗先刚, 姚汉民, 周冲喜, 等. 可提高光刻分辨率的新技术. 光子学报, 2000, **29**(9): 834~837
Luo X G, Yao H M, Zhou C X, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(9): 834~837
- 2 张锦, 冯伯儒, 郭永康, 等. 四激光束干涉光刻制造纳米级孔阵的理论分析. 光子学报, 2003, **32**(4): 398~401
Zhang J, Feng B R, Guo Y K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 398~401
- 3 李凤有, 谢永军, 孙强. 激光直写光刻中线条轮廓的分析. 光子学报, 2004, **33**(2): 136~139
Li F Y, Xie Y J, Sun Q. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 136~139
- 4 陈林森, 邵洁, 王雪辉, 等. 一种二元整形元件激光直写方法的实验研究. 光子学报, 2005, **34**(3): 346~349
Chen L S, Shao J, Wang X H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 346~349
- 5 马韬, 沈亦兵. 大视场投影光刻物镜的畸变特性检测. 光子学报, 2005, **34**(1): 46~49
Ma T, Shen Y B. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 46~49
- 6 Lchlhara Y, Kawata S, Hikima L, et al. Illumination system of an excimer laser stepper. *Proc SPIE*, 1989, **1138**: 137~143
- 7 Shafer D. Gaussian to flat-top intensity distributing lens. *Optics and Laser Technology*, 1982, **37**(6): 159~164
- 8 Kawamura Y, Itagaki Y, Toyoda K, et al. A simple optical device for generating square flat-top intensity irradiation from a Gaussian laser beam. *Opt Commun*, 1983, **48**(1): 44~52
- 9 Latta M, Jain K. Beam intensity uniformization by mirror folding. *Opt Commun*, 1984, **49**(2): 435~442
- 10 Wangler J, Ittner G. Illuminating arrangement for a projection microlithographic apparatus. US Patent, 2001, 6285443 B1
- 11 Tracey D H, Wu F Y. Exposure dose control techniques for excimer laser lithography. *Proc SPIE*, 1988, **922**: 437~443
- 12 Zwart G D, Brink M V, George R, et al. Performance of a step and scan system for DUV lithography. *Proc SPIE*, 1997, **3051**: 817~835

Study of Integrator Rod in Step-and-scan Lithography

Guo Liping¹, Huang Huijie¹, Wang Xiangzhao²

1 *Information Optics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*

2 *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Received date: 2005-03-10

Abstract Based on geometric optics, the homogenizing principle of integrator rod was analyzed. Then the application of integrator rod in step-and-scan lithography systems was introduced. After that, the effect of NA of incident beam on the intensity distribution at blades plane was discussed and the relationship between the dimensions of integrator rod and the illumination field was obtained. The analysis above provided foundation for the design of integrator rod in step-and-scan lithography systems.

Keywords Optical lithography; Illumination uniformity; Non-sequential component; Integrator rod



Guo Liping received B. S. degree from Qufu Normal University, Department of Physics in 1999 and M. S. degree from Yantai University, College of Photoelectricity Information for science and technology in 2002. Currently she is pursuing the Ph. D. degree at the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her major research area includes optical lithography technique.