

高分辨率投影光刻机光瞳整形技术

胡中华^{1,2} 杨宝喜¹ 朱菁¹ 肖艳芬^{1,2} 曾爱军¹ 黄立华¹ 赵永凯¹ 黄惠杰¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 在高分辨光学光刻技术中,光瞳整形技术针对不同的掩模图形产生特定的光瞳光强分布模式,从而实现分辨力增强,获得更好的成像性能。概述了高分辨率投影光刻机照明系统中基于衍射光学元件(DOE)、微透镜阵列(MLA)和微反射镜阵列(MMA)的3种光瞳整形技术,并对这些技术的工作原理、设计制作方法和性能特点进行了归纳与总结。

关键词 光学制造;光刻;离轴照明;光瞳整形;衍射光学元件;微透镜阵列;微反射镜阵列

中图分类号 O43;TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.111101

Pupil Shaping Techniques in High Resolution Projection Exposure Tools

Hu Zhonghua^{1,2} Yang Baoxi¹ Zhu Jing¹ Xiao Yanfeng^{1,2} Zeng Aijun¹

Huang Lihua¹ Zhao Yongkai¹ Huang Huijie¹

¹Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the high resolution optical lithography technology, illumination pupil shaping is employed to enhance the lithography resolution and achieve high imaging performance by using various illumination modes according to different mask structures. In this paper, three approaches of pupil shaping techniques based on diffractive optical element (DOE), micro lens array (MLA) and micro mirror array (MMA) are summarized. The principles, design and manufacturing methods are concluded.

Key words optical fabrication; lithography; off-axis illumination; pupil shaping; diffractive optical element; micro lens array; micro mirror array

OCIS codes 110.5220; 220.2945; 220.3740

1 引言

投影光刻机是当今技术最为密集、精度要求最高的一种大规模集成电路制造装备,获得各种复杂光瞳光强分布与极高光强均匀性的照明技术及接近零像差的光学成像技术是其核心技术。相应地,由照明系统与投影物镜构成的曝光系统是光刻机的核心分系统。为了满足光刻图形特征尺寸不断缩小和实现特殊图形曝光的要求,人们发展了多种光刻分辨力增强技术,使光学光刻技术的生命力不断得到延伸。而通过光瞳整形技术获得的离轴照明是光刻机中最为常用且最为有效的一种分辨力增强技术。随着光学光刻技术的不断发展,光瞳整形技术已成为光刻技术中的一种必备的特殊技术而不断得到创新与发展,有时甚至成了光刻技术

收稿日期: 2011-04-29; **收到修改稿日期**: 2011-06-02; **网络出版日期**: 2011-09-30

基金项目: 国家科技重大专项项目(2009ZX02205-001)资助课题。

作者简介: 胡中华(1984—),男,博士研究生,主要从事高数值孔径光学光刻技术方面的研究。

E-mail: huzhonghua@siom.ac.cn

导师简介: 黄惠杰(1966—),男,研究员,主要从事光散射测量技术、光学生物传感技术、光学检测技术和光学光刻技术等方面的研究。E-mail: huanghuijie@siom.ac.cn(通信联系人)

水平得以提升的一种推动力。

光刻机需要针对不同的掩模结构采用不同的离轴照明模式,以增强光刻分辨力、增大焦深、提高成像对比度,从而得到更好的成像性能^[1]。而这些照明模式就是通过光瞳整形技术来实现的。光瞳整形技术是指在光刻照明系统中采用特殊设计的光学元件调制入射激光束的强度或相位分布,从而在光瞳面上得到所需要的特定光强分布。它主要通过设计能产生不同照明模式的光瞳整形元件来实现。由光瞳整形元件产生的照明模式经过匀化等处理之后作为新的光源照射在掩模面上。离轴照明技术(OAI)最早由日本学者于1991年提出,其不仅能提高投影物镜的分辨力而且能够明显改善焦深与成像对比度,因此在投影光刻系统中得到了广泛的应用^[1~3]。

在光刻机中,普遍采用衍射光学元件(DOE)来实现光瞳整形。另外,德国 LIMO 公司等用折射型微透镜阵列(MLA)实现了有限图样的光瞳整形^[4],最近荷兰光刻机制造商 ASML 公司又用 FlexRay 可编程照明技术实现了各种照明模式,这种照明技术采用的是微反射镜阵列(MMA)^[5]。光瞳整形技术在光刻机照明系统中非常重要,整形效果将直接影响到硅片面上掩模图形的成像质量。光瞳整形元件在实现不同的照明模式的同时,不仅要求尽量避免能量损失、提高能量利用率,而且对极平衡性和椭圆度^[6]、照明均匀性也有很高的要求。本文主要对光刻照明系统中3种光瞳整形技术的工作原理、设计制作方法、性能特点进行总结与归纳。

2 基于衍射光学元件的光瞳整形技术

图1归纳了20世纪90年代初期到现在用DOE实现的几种典型照明模式^[7],其中,(a)为20世纪90年代初期使用的环形照明模式,(b)为2000年左右使用的二极和四极照明模式,(c)为2005~2008年左右使用的 Soft-Quasar^[8]和 Bulls-Eye^[9]照明模式,(d)为2009年至目前已实现的一部分自由照明模式。照明模式的演变是为了适应集成电路线宽不断缩小,掩模版图形日益复杂的需求。

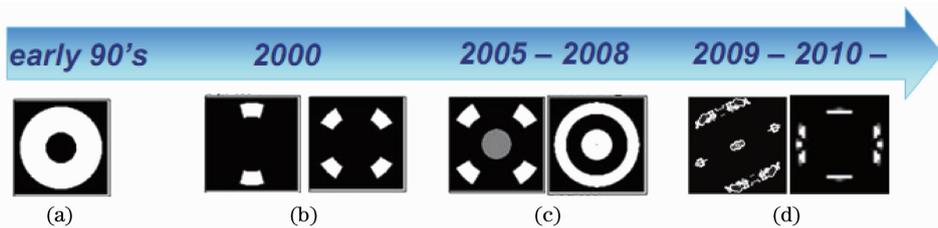


图1 照明模式的历史演变示意图
Fig.1 History of illumination modes

2.1 工作原理

DOE实现离轴照明的原理如图2所示,光波入射到特殊设计的衍射光学元件上,通过衍射光学元件的振幅或相位调制,在远场(即投影物镜光瞳的共轭面)形成特定的衍射花样,以实现离轴照明模式所需的光瞳整形。根据惠更斯-菲涅耳原理,衍射花样的形成可以看作是透射波前上每一点发出的子波在远场叠加的结果。在光刻机中,DOE主要是二维分布的相位调制型元件,这可避免振幅调制元件引起的光强衰减。

2.2 设计与制作方法

DOE的设计是已知输入与输出求相位恢复的过程,主要是基于物理光学标量衍射理论,通过迭代傅里叶变换算法(IFTA)计算出DOE的相位分布^[10~15]。标量衍射法由于计算效率较高,因此应用较多,其中局部优化算法有Gerchberg-Saxton(G-S)算法^[16]或误差减小法(Error-reduction)^[17],输入输出算法(Input-output)^[18],直接二元搜索法(Direct binary search)^[19],全局优化算法有模拟退火(Simulated annealing)^[20]和遗传算法(Genetic algorithm)^[21]等。而对于元件特征尺寸小于或接近波长时或者需要考虑光波的偏振特性时,就需要运用矢量衍射法。

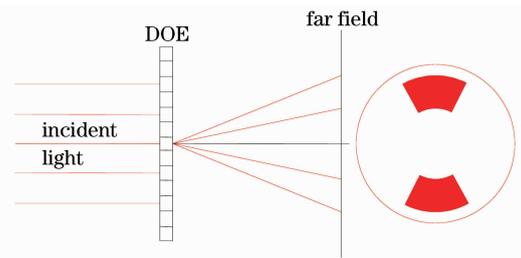


图2 DOE实现离轴照明原理图
Fig.2 Schematic of OAI with DOE

为了适应入射光不稳定的情况,减小入射光束的变化和对准对照明模式光场分布的影响,在 IFTA 基础上发展出一种周期性光栅型的衍射光学元件,每一个子单元都能将入射光衍射到期望的角度分布上去,所有子单元的衍射光在远场上重叠从而得到预期图形^[22,23]。这种周期性元件所具有的一个明显的优势是空间不变性,但是对于相干光来说强度分布中有类似散斑的波动。在非相干照明条件下,这种类似散斑的波动能够得到平滑,不会影响光刻机照明系统性能。例如菲涅耳波带片的周期结构,如图 3 所示。图中是用于光刻照明光瞳整形的 DOE,采用六边形来近似圆形照明,为了提高相位板的填充因子,提高能量利用率,采用六边形结构,每一个六边形里面都是一个菲涅耳波带片^[24]。

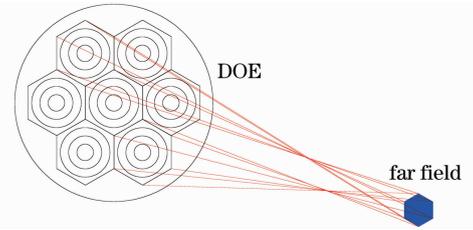


图 3 六边形近似圆形照明的 DOE 远场成像示意图

Fig. 3 Illustration of DOE far-field imaging with illumination of hexagonal approximating circular

为了实现 DOE 的加工,其上的相位分布通常设计成 2^N 个台阶相位(N 为整数)。DOE 的制造方法是传统的光刻工艺,对于 2^N 台阶的 DOE,需要 N 次掩模套刻来完成 DOE 的加工。DOE 制造工艺步骤主要为甩胶、曝光、显影、刻蚀(图形转移)和去胶^[25,26]。DOE 设计仿真完成以后,需要用电子束直写或者激光直写的方法来制造掩模板,通过光刻将掩模图形转移至光刻胶上,显影之后需要用反应离子刻蚀(RIE)或者离子束研磨(IBM)将掩模图形转移到基底上。对于现阶段主流光刻机中所用的 DOE,其特征尺寸在微米或亚微米量级,台阶高度(最小刻蚀深度)在 20~80 nm 范围,需要加工精度较高的光刻设备进行加工。

对于光刻机中用的 DOE,其工作波长一般在紫外与深紫外波段(365、248 和 193 nm),因此其加工精度引起的整形性能的变化是需要考虑的因素。加工工艺误差主要包括:掩模版加工误差、套刻对准误差、刻蚀深度误差等,这些误差将降低 DOE 的能量利用率,并产生有害的中心零级衍射亮斑。另外,台阶加工的垂直度误差也将增大 DOE 的散射引起的能量损失。目前,国内外的研究单位都在致力于提高紫外与深紫外波段 DOE 的加工精度。

2.3 性能特点

采用 DOE 作为光瞳整形元件的主要优点是整形灵活,能够通过 DOE 上相位分布的设计实现任意的光瞳花样(离轴照明模式),如二极、四极以及自由照明等。其次,DOE 能实现输出数值孔径的可控调节。按照夫琅禾费衍射原理,DOE 能实现的数值孔径 $NA = \lambda/d$,其中 λ 为入射激光的波长, d 为 DOE 的相位单元尺寸,通过改变 d 的大小,就可以实现输出数值孔径的调节。最后,DOE 能够得到较高的衍射效率输出,能量利用率高,对于 2^N 个相位台阶的 DOE,其理论衍射效率为 $\eta = |\sin(\pi/L)/(\pi/L)|^2$,当 $N=4$ 时, η 可以达到 98.6%^[27]。随着刻蚀工艺的不断发展,也有一些 DOE 元件采用连续面形实现各种照明方式,连续面形的 DOE 有更高的衍射效率^[28]。但是,根据上述讨论,加工误差产生的能量损耗还较大。例如,德国 Jenoptik 公司加工出的 16 台阶 DOE,在两面镀增透膜的情况下,其能量利用率最高可以达到 94%。

DOE 对于入射光束的误差较为敏感,入射的倾斜将引起远场花样的偏心,从而降低极平衡性与增大光瞳椭圆度,因此在 DOE 前面通常会有光束稳定单元来控制光束垂直入射到 DOE 上;而入射光束的发散角会引起远场花样的塌边,因此激光光束的发散角应较小,且束腰位置应处在 DOE 的附近。

由于 DOE 产生的远场花样是照射在 DOE 上的子光束衍射后相互叠加的结果,因此其散斑噪声的影响不能忽略,最直接的影响是使远场花样的均匀性变差。所以,在光刻机中使用空间相干性较差的准分子激光器作为光源,从而提高 DOE 输出的远场均匀性。目前所能实现的远场光斑的顶部非均匀性小于 5%。另外,在高端光刻机($NA > 0.75$)中,通常需要采用偏振照明的方式,而 DOE 不具有保偏特性,限制了其在高端光刻机中的使用,微透镜阵列以及微反射镜阵列都提供了相应的解决方案。

3 基于微透镜阵列的光瞳整形技术

由于现在光刻用的准分子激光器都是多模激光器,其相干性差,因此不同于相干光的光束整形问题。Dicky 等^[29]提出的微透镜阵列整形系统很好地解决了多模激光束的整形问题。它们依靠对光束的分割和子光束的叠加来达到整形的目的,消除了入射激光光强分布不均匀的影响,实现了均匀照明,因此该方法特别

适合光场强度分布不规则、相干性差的准分子激光器的光束整形^[30]。

步进扫描光刻机为了得到更好的成像性能,对不同的掩模结构需要采取不同的照明模式,现阶段光刻照明光瞳整形一般都是通过 DOE 实现的,DOE 可以得到多种照明模式,但是由于零级峰值和高阶衍射等因素的影响,实际的衍射效率只有 80%左右。目前这些正在使用的部分照明模式同样能通过折射型 MLA 实现,它相对于 DOE 的优势在于有将近 100%的能量利用率,这对于提高步进扫描光刻机中昂贵的光源的利用率,提高产率是很有好处的^[31,32]。

3.1 工作原理

用 MLA 已经实现了六边形、环形、极形状为矩形的二极和四极等照明模式,如图 4 所示,六边形照明模式用来近似传统照明,结合锥形镜可实现环形照明^[4]。六边形光场是由球面或非球面小透镜阵列产生的,小透镜的外形也是六边形,这样有理论上有 100%的填充因子,对能量的利用率也几乎达到 100%。二极照明模式由柱面微透镜组成的单层 MLA 实现,每一极都有均匀的强度分布或自定义的强度梯度,极的形状为矩形,能量利用率将近 100%。四极照明模式可以使用两个垂直交错的产生二极照明模式的柱面小透镜阵列获得,这种四极照明模式的优点在于相对比较容易生产,缺点在于只能产生这种矩形的极形状。

这种折射型微透镜阵列产生矩形二极照明系统的原理如图 5 所示^[33],这个系统由两面相互垂直的折射型微透镜阵列和场镜组成,其中 p_v, f_v 分别为柱面小透镜阵列垂直方向的节距和焦距, F 为场镜的焦距, D_{v1}, D_{v2} 分别为二极照明上下两极在垂直方向的长度, $D_{v1} = D_{v2} = p_v \times f_v / F$ 。水平方向和垂直方向类似。微透镜阵列基板的一面是经典的微透镜阵列,用于在远场得到均匀分布;基板的另一面是柱面小透镜阵列,和第一面的透镜阵列垂直放置,用于产生矩形光斑。

3.2 设计与制作方法

光束的形状和光强分布决定了透镜的表面面形及几何结构。这种单边 MLA 结构或者更复杂的 MLA 系统可以用来产生精确的照明形状和均匀化光束^[4,33]。微透镜可能的面形可描述为

$$z = \frac{c_v p^2}{1 + \sqrt{1 - c_v^2 (c_c + 1) p^2}} + \sum_{i=3}^{\infty} A S_i p^i,$$

式中 z 代表矢高, c_v 代表曲率半径, p 代表径向距离。当二次系数 $c_c = 0$ 并且每一项多项式为 0 时,上式以曲率半径的形式描述了经典的球面透镜;球面透镜只能在小数值孔径的情况下形成均匀的光场分布,在大数值孔径的情况下由于大量的球差存在,形成的光场分布并不均匀,这样可以用不为零的二次系数来校正光场的强度分布和不均匀性。高阶多项式可以用来进一步消除像差或产生特定的光场分布。

由于在照明系统中使用了傅里叶透镜,从微透镜阵列出射的特定角度的光线经过场镜都会目标平面上形成一个斑点。在设计二极照明模式时,要避免零度左右的角度,可以采用高阶非球面系数来切除均匀场分布的中间部分,这样就可以在远场得到均匀性较高的对称分布的二极。四极可以通过采用两片这样的透镜阵列获得,可以实现偏振保持和极的不同强度控制^[4]。

为了制造这种折射型微透镜阵列,人们研发了一种热熔胶工艺^[34],将光刻胶加热至融化,依靠表面张力形成球面或柱面小透镜,然后通过刻蚀就可以将球面或柱面小透镜转移到基底上^[35,36],如图 6(a)所示。图 6(b)是用热熔胶工艺做成的一种柱面小透镜^[37]。另外,如果有选择性地刻蚀,刻蚀的面形就可以与光刻胶的面形不一样,这样就能刻蚀得到非球面,或者改变小透镜的垂直方向尺寸^[38]。热熔胶工艺只需要一次光

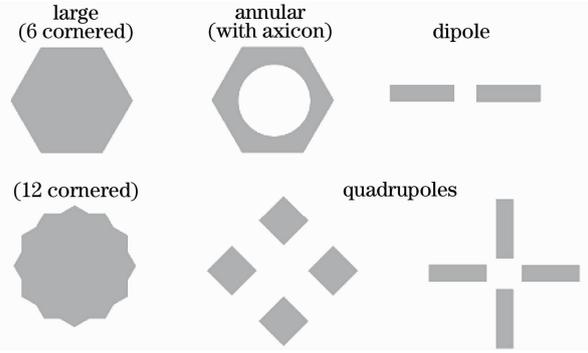


图 4 MLA 实现的几种照明模式

Fig. 4 A few illumination modes with MLA

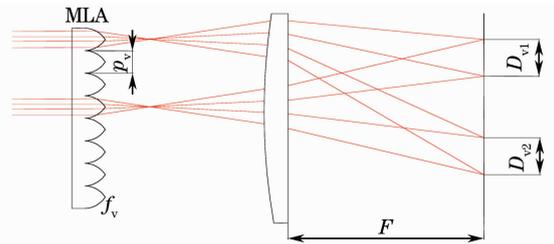


图 5 MLA 形成二极照明系统原理图

Fig. 5 Dipole illumination diagram with MLA

刻,因此对于掩模对准误差或斜坡误差是不敏感的。但是由这种工艺制作成的微透镜阵列对面形误差比较敏感,刻蚀深度的误差将导致焦距的变化或远场孔径角的变化。

3.3 性能特点

MLA 与 DOE 相比的优势在于有较高的能量利用率($>95\%$),这是因为 MLA 没有高阶衍射损耗和台阶引起的散射损耗;其次,MLA 对入射光的发散角和倾斜没有 DOE 那样敏感;再次,MLA 能够产生非常均匀的远场光斑,其非均匀性可以小于 0.5% ;最后,MLA 在光束变换过程能够实现偏振态的保持,可以用在 $NA > 0.75$ 的偏振光成像的光刻机中。

DOE 的台阶结构在一定程度上易受到高能激光的破坏,影响其使用寿命,而 MLA 由于采用连续面型,因此寿命相对更长。在安装上也完全可以利用现有的 DOE 夹持结构,可以对现有的基于 DOE 的照明系统进行更新和升级。MLA 的材料是熔石英或者氟化钙,因此适用于整个深紫外(DUV)波段。

MLA 的缺点在于所能实现的照明模式不是任意的,例如很难实现具有弧形分布或者任意分布的照明模式。另外,MLA 的输出数值孔径角由其微透镜的大小和曲率半径所决定,受到加工工艺的限制,通常较小,一般在几十毫弧度。因此,有必要开发既能实现自由照明模式、远场光斑均匀性好,而且不改变照明光偏振特性的光瞳整形技术。

4 基于微反射镜阵列的光瞳整形技术

在高数值孔径浸没式光刻机中,荷兰 ASML 公司研发了一种 FlexRay 可编程照明技术^[5,7],它不是通过插入和切换不同的 DOE 来实现光瞳整形,而是通过控制可编程 MMA 来实现的。这种可编程 MMA 由数千个微反射镜组成,它能在几分钟内实现任意光瞳形状,已经应用到 ASML NXT:1950i 等先进机型中,图 7 就是 FlexRay 可编程照明技术实现的一种光瞳形状^[39]。

4.1 工作原理

在 FlexRay 光瞳整形技术中,所需光源的光场角度分布,也就是特定的光瞳图形,是通过控制数千个微反射镜的方位来实现的。每一个微反射镜反射一个光点到光瞳面上。通过改变每一个反射镜的方位角就能改变光瞳面上光斑的位置,这样就能产生特定照明模式的照明花样^[5,40]。工作原理实质上是数字微镜器件(DMD)空间整形原理,微镜的转动是由它下面存储单元的状态来控制的,靠微镜本身与它下面存储单元之间电压差所产生的静电引力来完成^[39]。当输入到 DMD 各微镜器件的信号不完全相同时,每个微镜就会绕其对角线不停地有开态转至关态,又由关态转至开态,在同一时刻微镜的状态各异,也就是说每个镜子并不完全同步^[41]。为论述方便,采用四反射镜来说明 FlexRay 光瞳整形的原理。如图 8 所示,(a)是由所有的反射镜在中间位置产生的传统照明模式;(b)是由控制反射镜旋转后产生的二极照明,其中一半的反射镜顺时针旋转,一半的反射镜逆时针旋转。值得注意的是所有的反射镜都用来产

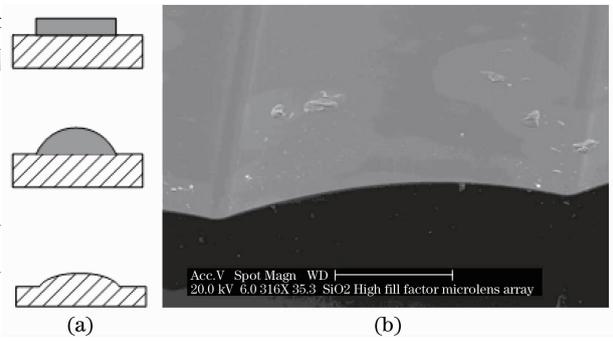


图 6 MLA 的加工工艺和扫描电子显微镜照片。

(a) 热熔胶工艺;(b)一种柱面小透镜

Fig. 6 MLA manufacture process and SEM photo.

(a) Photo-resist melting; (b) a cylindrical lenslet

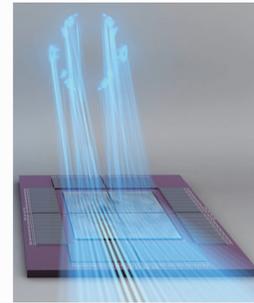


图 7 FlexRay 可编程照明技术实现的一种光瞳形状

Fig. 7 A freeform pupil shape under FlexRay programmable illumination technology

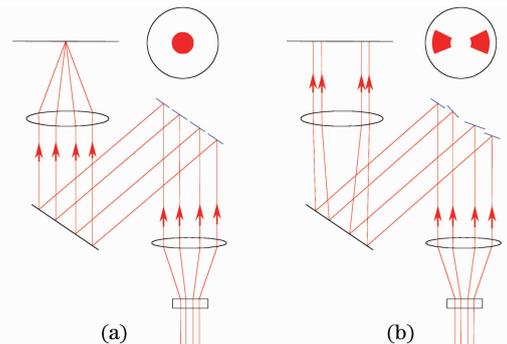


图 8 FlexRay 四反射镜形成的传统照明(a)和二极照明(b)原理图

Fig. 8 Schematic of FlexRay 4 mirrors forming.

(a) Conventional mode; (b) dipole illumination modes

生特定的光瞳形状,这意味着当从一种光瞳形状切换到另外一种光瞳形状时没有能量损失。光瞳的形成需要结合光源掩模优化软件,逐次迭代逼近预设的图样,光瞳的形状和质量需要精确控制每一个反射镜的角度,在 FlexRay 照明系统中,采用闭环控制来确保在曝光过程中它们处在正确的位置。

4.2 设计制作方法

微反射镜阵列的制作主要是基于 MEMS 技术,类似于数字投影仪中 DMD 的制造工艺。微反射镜由单晶硅制造,这样可以保证光学平整度和可重复性。制造工艺步骤为^[42]:

- 1) 在硅基质表面形成一对电极;
- 2) 在电极和基质上沉积一层牺牲层;
- 3) 定义主干以便形成支架;
- 4) 在支架上沉积一层柔韧性非常好的材料;
- 5) 在柔韧性非常好的材料上沉积金属层;
- 7) 刻蚀金属层和柔韧性好的材料层,形成单个微反射镜;
- 8) 除去牺牲层材料就可以得到微反射镜阵列。

微反射尺寸可小至 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,由于采用单晶硅材料,高度平整的反射镜在工作过程中不会变形,定位的精度和重复性都可以得到保证,可以满足光刻应用要求;同时由于硅膜良好的表面性质,可以加工出表面粗糙度非常低的微反射镜,表面粗糙度均方根值在亚纳米级^[43]。

4.3 性能特点

FlexRay 照明系统不仅能够产生二极照明、四极照明等常用的照明模式,而且可以产生任意的自由照明模式^[5,7,40]。自由照明能够增大工艺窗口,减小掩模误差增强因子,有传统的多极照明方式不可取代的优点。尽管可以用 DOE 来产生各种不同的照明模式,但是和这种可编程的照明技术相比还是有一些局限性。当需要使用一种新的照明模式时,从 DOE 的设计制造到安装调试,需要花费很多时间,而 FlexRay 可编程照明技术不需要安装调试新的硬件,它能在几分钟内实现由光源掩模优化(SMO)所决定的任意光瞳形状,可以大幅度节省时间,提高产能。另外,一般来说存放在 DOE 夹持器上的 DOE 的数量是有限的,而 FlexRay 可编程照明技术可以存储大量的不同的光源,可以无限制地调整,不但可以实现 DOE 能实现的照明模式,而且可以很容易地产生各种自由形式的照明模式,偏振保持性也很好。在工业生产中,FlexRay 快速调整和无限微调是很方便和实用的,光瞳的设置和校准时间大大减少,能够向后兼容,可以和 ASML 公司的 Aerial XP 照明系统互换,用在现有的工艺当中可以更快更有效地进行芯片研发。FlexRay 可编程照明技术已用在 TWINSKAN XT;1900i、XT 1950i、NXT 1950i 等机型中。反射式整形系统能够避免折射系统因器件本身的吸收和器件表面的反射而造成光能损失,但它对面形误差更为敏感。

5 小 结

光刻机中的光瞳整形技术是光刻机照明系统中的关键技术之一,光瞳整形的效果直接影响照明系统的性能,最终影响投影物镜的成像质量。光瞳整形技术主要是通过设计能产生不同照明方式的光瞳整形元件来实现的。由光瞳整形元件产生的照明模式经过均匀化等处理之后作为新的光源照射在掩模面上。光瞳整形元件的设计不仅要实现不同的照明模式,而且还要减少能量损失,提高能量利用率,对照明均匀性、偏振保持、寿命等也提出相应的要求。表 1 中对 3 种光瞳整形技术的性能指标进行了对比,可依据光瞳整形的要求选取相应的整形技术。

表 1 3 种光瞳整形技术的性能对比

Table 1 Performance comparison of three different beam shaping technologies

	η^*	Illumination modes	Far-field non-uniformity	Polarization maintenance	Sensitivity to incident beam	Cost	Manufacturing process
DOE	$<94\%^{**}$	Arbitrary	$<5\%$	Unable	Sensitive	High	Mature
MLA	$<95\%$	Limited	$<0.5\%$	Able	Insensitive	Very high	Complex
MMA	$\sim 99\%$	Arbitrary	$<0.5\%$	Able	Insensitive	Very high	Complex

* η is the represents energy efficiency; ** 16-step DOE.

6 结 论

对光刻机中光瞳整形技术作了归纳和概述,重点介绍了基于衍射光学元件、微透镜阵列的整形原理、设计制作方法和性能特点,同时也介绍了采用 MMA 的新一代 FlexRay 可编程自由照明技术的整形原理,并对各自的优缺点做了比较和说明。

本文也为今后光瞳整形技术的研究提供了参考。现阶段光刻机中光瞳整形元件主要还是衍射光学元件,但随着设计水平的不断提高和微透镜阵列制造工艺的不断成熟,如果折射光学元件也能像衍射光学元件一样产生满足光刻要求的光瞳分布,折射光学元件得到大量应用也是有可能的。采用 MMA 的 FlexRay 可编程自由照明技术是最新一代的技术,是光瞳整形一个新的方向,相信今后会得到更多的应用。

参 考 文 献

- 1 Harry J. Levinson, Principles of lithography[M]. Bellingham & Washionton: SPIE Press, 2001
- 2 Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(11): 2081~2086
张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(11): 2081~2086
- 3 Guo Liping, Huang Huijie, Wang Xiangzhao. Off-axis illumination for optical lithography[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(1): 23~25
郭立萍, 黄惠杰, 王向朝. 光学光刻中的离轴照明技术[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(1): 23~25
- 4 H. Ganser, M. Darscht, Y. Miklyaev *et al.*. High-throughput homogenizers for hyper-NA illumination systems[C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 61542
- 5 Melchior Mulder, A. Engelen, O. Noordman *et al.*. Performance of a programmable illuminator for generation of freeform sources on high NA immersion systems[C]. *SPIE*, 2009, **7520**: 75200
- 6 E. M. Sczyrba, S. Angonin. The importance of being homogeneous: on the influence of illumination inhomogeneity on AIMS images[C]. *SPIE*, 2005, **5992**: 859~872
- 7 Melchior Mulder, A. Engelen, O. Noordman *et al.*. Performance of FlexRay, a fully programmable illumination system for generation of freeform sources on high NA immersion systems[C]. *SPIE*, 2010, **7640**: 76401
- 8 Francois Weisbuch, Scott Warrick, Will Conley *et al.*. Assessment of 5-pole illumination for 65nm-node contact holes[C]. *SPIE*, 2005, **5754**: 1405~1416
- 9 A. C. Durr, K. Bubkim Chen. Experimental evaluation of bulls-eye illumination for assist-free, random contact printing at sub-65nm node[C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 615401
- 10 V. A. Soifer, V. V. Kotlyar, L. L. Doskolovich. Iterative Methods for Diffractive Optical Elements Computation[M]. London: Taylor & Francis, 1997
- 11 F. Wyrowski, O. Bryndahl. Iterative Fourier-transform algorithm applied to computer holography[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **5**(7): 1058~1065
- 12 Wu Rong, Zhao Dongfeng, Dai Yaping. Optimize design of diffractive optics elements by parallel simulated annealing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2544~2548
邬融, 赵东峰, 戴亚平. 并行模拟退火算法优化衍射光学元件设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2544~2548
- 13 J. S. Liu, M. R. Taghizadeh. Iterative algorithm for the design of diffractive phase elements for laser beam shaping[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1463~1465
- 14 Oliver Ripoll, Ville Kettunen, Hans Peter Herzig. Review of iterative Fourier-transform algorithms for beam shaping applications[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(11): 2549~2556
- 15 V. Arrizon, M. Testorf, S. Sinzinger *et al.*. Iterative optimization of phase-only diffractive optical elements based on a lenslet array[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(12): 2157~2164
- 16 R. W. Gerchberg, W. O. Saxton. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, **35**: 237~246
- 17 P. M. Hirsch, J. A. Jordan, L. B. J. Lesem. Method of making an object independent diffuser America, 3619022[P]. 1971-11-09
- 18 J. R. Fineup. Iterative method applied to image reconstruction and to computer generated holograms[J]. *Opt. Engng.*, 1980, **19**: 297~306
- 19 M. A. Seldowitz, J. P. Allebach, D. W. Sweeney. Synthesis of digital holograms by direct binary search[J]. *Appl.*

- Opt. , 1987, **26**(14): 2788~2798
- 20 S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, **220** (4598): 671~680
- 21 N. Yoshikawa, M. Itoh, T. Yatagai. Quantized phase optimization of two-dimensional Fourier kinoforms by a genetic algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(7): 752~754
- 22 V. Kettunen, O. Ripoll, H. P. Herzig. Beam shaping in deep UV; comparison of methods[J]. *Diffractive Optics*, 2001, **30**: 80~81
- 23 C. Kopp, L. Ravel, P. Meyrueis. Efficient beam shaper homogenizer design combining diffractive optical elements, microlens array and random phase plate[J]. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 1999, **1**: 398~403
- 24 V. Kettunen, Heptagon, Zurich. Applications of Diffractive and Micro-Optics in lithography[M]. Waltham: Academic Press. Encyclopedia of Modern Optics (Diffractive systems), 2004. 281~290
- 25 Jerry Leonard, James Carriere, Jared Stack *et al.*. An improved process for manufacturing diffractive optical elements for off-axis illumination systems[C]. *SPIE*, 2001, **6924**: 692420
- 26 Marc D. Himel, Robert E. Hutchins, Jamey C. Colvin *et al.*. Design and fabrication of customized illumination patterns for low k1 lithography; a diffractive approach[C]. *SPIE*, 2001, **4346**: 1436~1442
- 27 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Mingxian *et al.*. Binary Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 28 Yuri V. Miklyaev, Waleri Imgrunt, V. S. Pavelyev *et al.*. Novel continuously shaped diffractive optical elements enable high efficiency beam shaping[C]. *SPIE*, 2010, **7640**: 764024
- 29 Fred M. Dickey, Louis S. Weichman, Richard N. Shagam. Laser beam shaping techniques [C]. *SPIE*, 2000, **4065**: 338~348
- 30 Lin Yong, Hu Jiasheng. Laser beam shaping techniques[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(6): 1~4
林 勇, 胡家升. 激光光束的整形技术[J]. 激光杂志, 2008, **29**(6): 1~4
- 31 H. Ganser, L. Aschke, D. Hauschild *et al.*. Refractive optical elements[C]. Sematech 2nd International Symposium on Immersion Lithography, 2005
- 32 H. Ganser, L. Aschke, M. Darscht *et al.*. How refractive microoptics enable lossless hyper-NA illumination systems for immersion lithography[C]. *European Mask and Lithography Conference, Dresden*, 2006
- 33 T. Bizjak, T. Mitra, D. Hauschild *et al.*. Novel refractive optics enable multipole off-axis illumination[C]. *SPIE*, 2008, **6924**: 69242J
- 34 P. Nussbaum, R. Volkel, H. P. Herzig *et al.*. Design, fabrication and testing of microlens arrays for sensors and microsystems[J]. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*, 1997, **6**(6): 617~636
- 35 A. Schilling. Diffractive and Refractive Optical Microstructures: Theory, Design and Applications [D]. Neuchatel: University of Neuchatel, 2000
- 36 A. Schilling, R. Merz, C. Ossmann *et al.*. Surface profiles of reflow microlenses under the influence of surface tension and gravity[J]. *Opt. Engng*, 2000, **39**(8): 2171~2176
- 37 Oliver, Ripoll. Far-Field Beam Shaping Elements for Deep UV Lithography[D]. Neuchatel: University of Neuchatel, 2003. 54~55
- 38 P. Nussbaum, H. P. Herzig. Low numerical aperture refractive microlenses in fused silica[J]. *Opt. Engng.*, 2001, **40**(7): 1412~1414
- 39 Huang Dajie, Fan Wei, Lin Zunqi. Spatial laser beam shaping using digital micromirror device[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502008
黄大杰, 范 薇, 林尊琪. 数字微镜器件用于光束空间整形[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0502008
- 40 Jörg Zimmermann, Paul Gräupner, Jens Timo Neumann *et al.*. Generation of arbitrary freeform source shapes using advanced illumination systems in high-NA immersion scanners[C]. *SPIE*, 2010, **7640**: 764005
- 41 Han Chao, Wei Sui, Quan Xilong *et al.*. Holographic display of digital micromirror device[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 190~194
韩 超, 韦 穗, 权希龙 等. 数字微镜器件的全息显示[J]. 中国激光, 2010, **37**(1): 190~194
- 42 Gregory John McAvoy, R. P. S. O'reilly, V. P. Lawlor *et al.*. Methods of Fabricating Micro Mirror Assembly[P]. 2010, US2010/0149623
- 43 Fabian Zimmer, Frank Niklaus, M. Lapisab *et al.*. Fabrication of large-scale mono-crystalline silicon micro-mirror arrays using adhesive wafer transfer bonding[C]. *SPIE*, 2010, **7208**: 720807