

基于塔尔博特自成像光刻机的照明系统设计与分析

佟军民^{1,2}, 刘俊伯², 胡松²

¹许昌职业技术学院, 河南 许昌 461000;

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要 针对塔尔博特自成像光刻机对照明系统的特定需求, 基于成像照明光学设计理论, 引入非成像光学理论思想, 建立照明系统的初始结构。利用光学设计软件 Zemax 对照明系统光学初始结构进行优化, 并在 Lighttools 中对该照明系统进行建模和大规模分布式光线追迹。追迹结果表明, 在照明面积 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 范围内, 照明不均匀度约为 1.83%, 照明功率密度不小于 $1.15\text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。对照明面在光轴方向上的位移容差进行分析, 结果表明该照明系统可以满足塔尔博特自成像光刻的需求。

关键词 光学设计; 光刻; 照明系统; 容差分析; 塔尔博特自成像

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.082201

Design and Analysis of Illumination System of Talbot Self-Imaging Lithographic Equipment

Tong Junmin^{1,2}, Liu Junbo², Hu Song²

¹Xuchang Vocational College, Xuchang, Henan 461000, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract Based on optical design theory of imaging illumination and non-imaging optical theory, an initial optical structure of illumination system is established according to the special requirements of Talbot self-imaging lithographic equipment. The optical design software Zemax is applied to optimize the initial structure. The software Lighttools is used to set up models and perform large-scale ray tracing. The simulation result shows that the nonuniformity of illumination approaches 1.83% in the illumination area of $60\text{ mm} \times 60\text{ mm}$. Meanwhile, the power density is no less than $1.15\text{ mW} \cdot \text{mm}^{-2}$. The tolerance analysis is carried out on the illumination system. The results show that the illumination system satisfies the demand of Talbot self-imaging lithography.

Key words optical design; lithography; illumination system; tolerance analysis; Talbot self-imaging

OCIS codes 220.3740; 220.2945

1 引言

光栅、小孔阵列等周期性微纳结构是一种特殊的微纳结构, 在光谱分析、高精度检测、偏振调制、LED 图形化衬底、生物传感器等方面有着广泛的应用^[1]。根据瑞利判据和焦深公式可知, 现有的光刻机设备因光学系统的限制很难同时满足高分辨力、长焦深、大面积、高效率以及低成本等 5 个方面的要求, 成为阻碍周期性微纳结构尺寸进一步变小的瓶颈。塔尔博特自成像光刻可以在不依赖任何成像系统的情况下, 实现高分辨力周期结构的制备, 成为国际上光刻领域研究的热点之一^[2-4]。但塔尔博特自成像光刻需要对掩模板下的光场进行扫描积分, 对沿光束传播方向一定范围内的光场稳定性和一致性要求很高。现有光刻机照明系统在设计时并未专门针对此类问题进行优化和分析, 不能直接用于塔尔博特自成像光刻。本文设计了一种用于塔尔博特自成像光刻的照明系统, 该照明系统均匀性好, 照明面在一定范围内光场稳定性高、一致性好, 理论

收稿日期: 2017-03-16; **收到修改稿日期:** 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61376110)

作者简介: 佟军民(1969—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事微电子专用设备技术方面的研究。E-mail: tjmtx@126.com

上可以满足塔尔博特自成像光刻的需求。

2 塔尔博特自成像光刻原理

塔尔博特效应于 1836 年首次被英国科学家塔尔博特发现^[5]。该效应主要发生在单色平面波照射的周期性物体(掩模板)上。根据光的电磁波理论和角谱传播理论^[6],可以计算出沿光场传播方向以 $Z = N \times 2p^2/\lambda$ 为周期产生自成像,其中 N 为正整数, p 为掩模周期, λ 为入射光波长。同时,在 $Z = (2N - 1)p^2/\lambda$ 处会产生一个具有 π 相移的中间像。塔尔博特自成像光刻原理如图 1 所示。将硅片沿着光传播方向进行 $N(N \geq 1)$ 个周期的扫描式空域积分,不仅可以延长光刻焦深,而且由于空域中塔尔博特像和中间像的同时存在,会在硅片表面形成频率 2 倍于掩模周期频率的图案,从而实现高分辨力周期图案光刻^[7]。

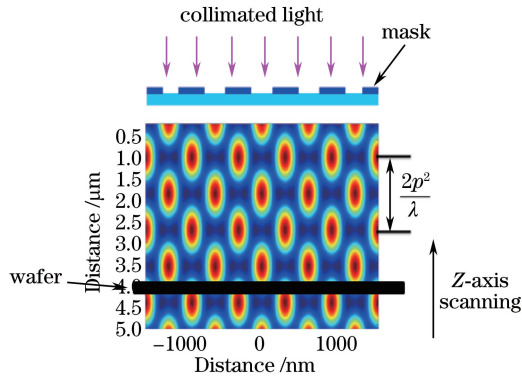


图 1 塔尔博特自成像光刻原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of Talbot self-imaging lithography

从图 1 可以看出,塔尔博特自成像光刻存在一个对光场进行扫描积分的过程,所以对光场分布的稳定性提出了很高的要求。理论上塔尔博特自成像光刻需要掩模板受到均匀平面波照射,才能精确地在硅片表面呈现频率 2 倍于掩模周期频率的图案。这对光刻机照明系统的照明不均匀性、照明能量分布、照明面附近的光场稳定性和一致性提出了更高的要求。

3 光刻机照明设计理论

在光刻机照明系统研究领域中,主要的研究目标是光能传输效率的最大化,照明面拥有高度的均匀性并且能够高度精确地控制光强的分布。照明光学经过长期的发展,现在主要分为:基于成像光学的设计理论和基于非成像光学的设计理论两大类。

基于成像光学的照明设计理论发展较为成熟,主要以几何光学成像理论作为设计依据,在像面处实现均匀照明。现有的成像型照明系统大部分都是基于临界照明和科勒照明两种结构发展起来的。临界照明基本原理如图 2 所示,聚光镜直接将光源成像到照明面上,即光源的像与被照明的物体重合。光源自身的不均匀性会对照明面的均匀性造成极大的影响,所以临界照明结构不适用于需要大面积照明的系统。

科勒照明克服了阿贝照明中照明物面受光源不均匀性影响的不足^[8]。科勒照明结构如图 3 所示,光源发出光束经科勒镜成像至孔径光阑处。孔径光阑放置在聚光镜的前焦面处,因此孔径光阑又被聚光镜成像

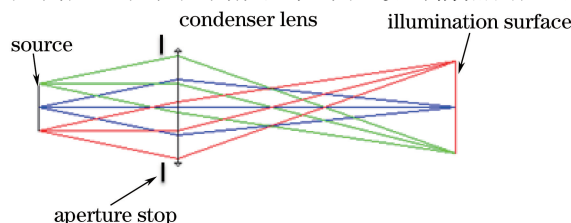


图 2 临界照明光学结构

Fig. 2 Optical structure of critical illumination

至无穷远,即光源的二次像在无穷远,从而形成远心照明。科勒照明结构的视场光阑放置在科勒镜之后,通过聚光镜成像在照明面处,与光源本身没有对应的物像关系。另外,在这种照明结构中,可以通过调整视场光阑和孔径光阑来控制照明面积和照明孔径角,这是科勒照明的一大优势。

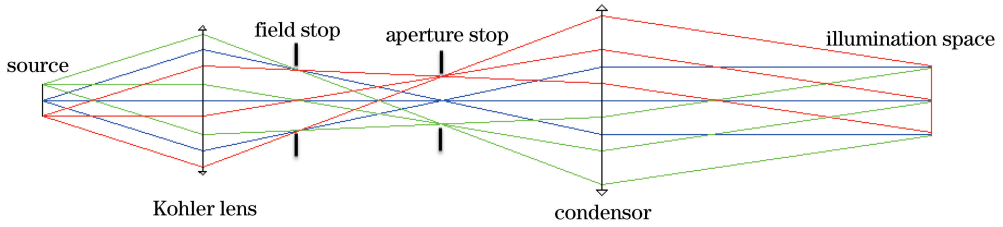


图3 科勒照明的光学结构

Fig. 3 Optical structure of Kohler illumination system

非成像光学理论最早于20世纪60年代提出,直到70年代才逐步发展成为理论体系^[9]。相比于传统的成像光学而言,非成像光学所关心的不是能否在目标平面上成像以及成像质量如何,而是光源的能量利用率以及能量分布情况^[10]。在非成像光学理论中,光学扩展量 E 是一个非常重要的概念。光学扩展量 E 定义为

$$E = \iint n^2 \cos \theta dA d\omega, \quad (1)$$

式中 n 为物方折射率, θ 为物方孔径角, A 为光束通过面积, ω 为光束所占有的立体角。光学扩展量描述了光束所通过的面积和光束所占有的立体角的积分,用于权衡所要求的面积和立体角^[11],并以此确定系统初始结构。

另一方面,在二维空间中,光学扩展量可以简化为 $E = ny \sin \theta$ 。根据光学扩展量的不变性,可以得到物像关系,即拉赫不变量为

$$ny \sin \theta = n'y' \sin \theta', \quad (2)$$

式中 y 为物高, y' 为像高, n' 为像方折射率, θ' 为像方孔径角。

在光刻机照明系统的设计中,主要依据成像光学理论对科勒照明的初始结构进行求解,并以像质评价作为参考对结构进行优化,再利用非成像光学理论对能量分布、传输以及前后光学系统数值孔径衔接等问题进行分析和改进。

4 几何光学分析与优化设计

4.1 设计总体思路

一个光学系统要实现均匀照明的目的主要有重叠法和裁剪法两种方法。光刻机照明系统多数采用重叠法,即利用复眼透镜阵列将光源发出的光细分成多个子光束,每个子光束都与聚光镜构成一个科勒照明结构,并在照明面上叠加,以达到均匀照明的目的。由于采用重叠法的照明系统光学元件数量较多,光线追迹数据量十分庞大,故在设计塔尔博特光刻机照明系统时,采用分段设计、整合追迹优化的方式,以提高仿真优化效率。同时,为了避免过多的空间变量导致光学优化效率及准确性降低,必须预先设定某些参数,结合近轴几何光学推算各分段光学结构的初始参量,再通过建立Zemax优化函数,对初始结构进行优化,并将优化后的结构参数导入Lighttools软件中进行大规模的光线追迹仿真。照明系统设计总体思路如图4所示。

综合考虑塔尔博特自成像光刻对掩模入射光的要求,对照明系统提出表1所示设计指标。相比于传统光刻机照明系统,该技术指标最大的不同在于光学结构优化设计完成后,需要对照明面沿光束传播方向在一定范围内进行扫描分析,即容差分析。在扫描范围内,照明面的性能参数必须满足表1中列出的参数,并具有良好的光场分布稳定性。

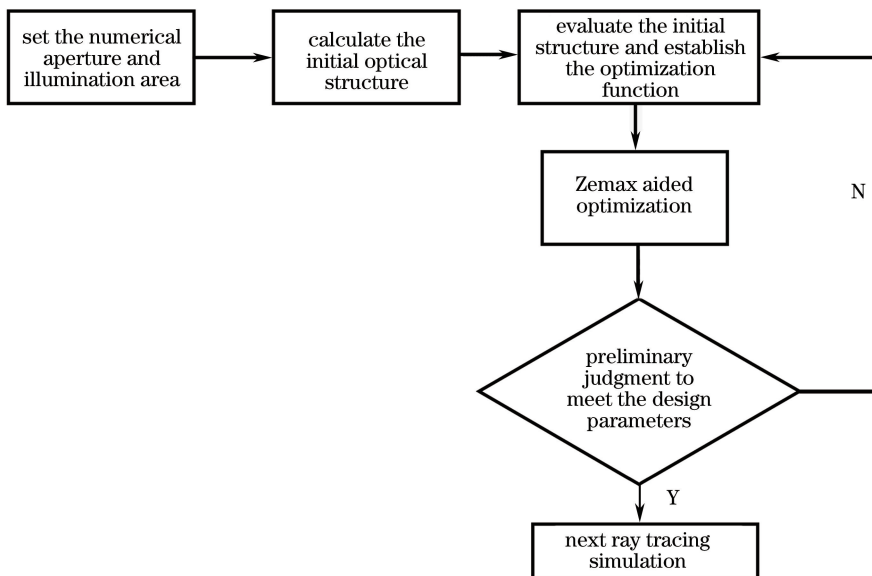


图4 塔尔博特自成像光刻机照明系统设计思路框图

Fig. 4 Flow chart of illumination system design of Talbot self-imaging lithographic equipment

表1 照明系统设计指标

Table 1 Design indexes of the illumination system

Item	Value
Back working length /mm	300
Scanning range /mm	± 2
Numerical aperture	0.04
Illumination area / $(\text{mm} \times \text{mm})$	60×60
Nonuniformity /%	< 2
Optical material	Silica
Power / $(\text{mW} \cdot \text{mm}^{-2})$	> 1

4.2 科勒照明结构设计

4.2.1 双排复眼阵列

在光刻设备的照明系统中,通常采用复眼透镜阵列组作为匀光器件。复眼透镜阵列由数个子透镜组成,其基本原理是利用复眼透镜阵列将光束切割为若干个子光源,再由后续光学系统将各子光源叠加到成像面上,从而实现叠加法照明。在照明面上由于子光束能量积分叠加,消除了光源本身不均匀带来的影响,照明均匀性可以得到很大提高,同时亦可实现照明区域的高能量化^[12]。

如图5(a)所示,早期复眼透镜阵列多为单排结构,这种结构最大的缺陷是轴外斜入射光线出射后,发散角依然较大,后续双排结构的复眼透镜阵列则能有效克服这种缺点。图5(b)所示双排复眼结构中,前后两排复眼阵列几何光学参数相同,且互相位于对方焦面附近。根据高斯成像公式 $1/l' - 1/l = 1/f'$,可以推出两排复眼互为场镜。通过这种结构,斜入射的平行光线在出射时被校正为近似平行于光轴的平行光,从而减小后续光学元件的尺寸,同时让更多的光线进入后续光学元件,以提高光能利用率。

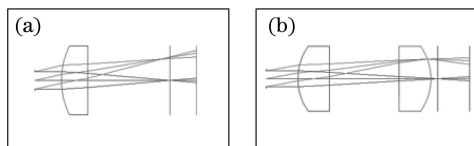


图5 (a)单排子透镜阵列;(b)双排子透镜阵列

Fig. 5 (a) Single lenslet array; (b) double lenslet arrays

设计指标中,要求照明数值孔径 $NA=0.04$,但在设计时,为了保证复眼前后光学系统的匹配,复眼的数值孔径应略小于后续聚光镜组的数值孔径,结合单排复眼加工工艺以及装配工艺,在保证照明均匀性的前提下,复眼尺寸不宜过小。设计复眼直径 $D_1=5\text{ mm}$ 。

由图 6 可得

$$\tan u'_1 = \frac{D_1}{2f'_1}, \quad (3)$$

$$n' \sin u'_1 = NA, \quad (4)$$

$$xx' = ff', \quad (5)$$

$$n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{l} \right) = \frac{1}{r} - \frac{1}{l'}, \quad (6)$$

式中 r 为子透镜的曲率半径, u'_1 为像方孔径角, f'_1 为复眼像方焦距, x 为以物方焦点为原点的物距, x' 为以像方焦点为原点的像距, l 为以物方主点为原点的物距, l' 为以像方主点为原点的像距。

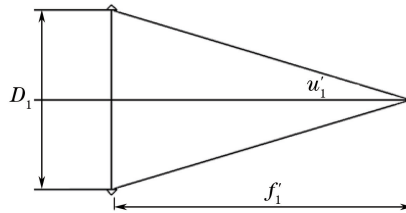


图 6 单排子透镜阵列初始结构计算几何关系

Fig. 6 Geometrical relationship between single lens let

由 $E = n_y \sin \theta$ 和(2)式可以计算出复眼阵列子透镜的焦距 $f' = 62.5\text{ mm}$, 并根据近轴光路(4)式和(5)式推出子透镜的曲率半径 $r \approx 32\text{ mm}$ 。因塔尔博特效应的特殊需求,复眼采用石英材料,利用 Zemax 中 RMS Spot Radius 优化函数作为优化依据对子透镜结构进行优化。在优化过程中主要保证子透镜焦距与理论值的一致性。经 Zemax 优化后单排子透镜的结构如图 7 所示。复眼透镜阵列采用图 8 所示错位方式进行排布。在这种排布方式中,通光区域中每一子透镜的边缘都与上下相邻的子透镜中心重合,可以有效消除边缘不平整造成的影响,显著提高照明的均匀性。



图 7 单排子透镜

Fig. 7 Single lenslet

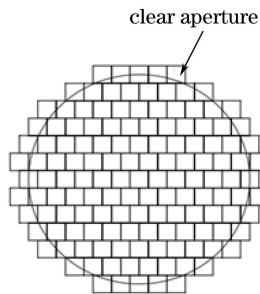


图 8 错位排布的子透镜阵列

Fig. 8 Dislocated lenslet array

4.2.2 聚光镜组

根据科勒照明原理,聚光镜组将复眼阵列在孔径光阑处所成的一次像成像在无穷远。由此可以推导出聚光镜与单排子透镜之间的几何关系,如图 9 所示。

由图 9 可得

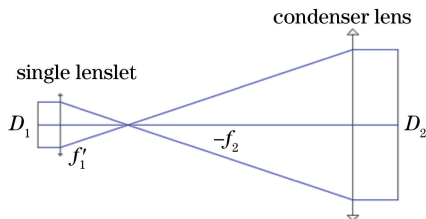


图9 聚光镜和单排子透镜的几何关系

Fig. 9 Geometrical relationship between condenser lens and single lenslet

$$\frac{D_1}{D_2} = \left| \frac{f'_1}{f_2} \right| = \left| \frac{1}{\beta} \right|, \quad (7)$$

式中 f_2 为聚光镜焦距, β 为放大倍率, D_1 为复眼直径, D_2 为照明宽度。

根据(7)式和表1提出的照明宽度 $D_2 = 60$ mm, 可以初步计算出聚光镜的焦距 $f_2 \approx 760$ mm, 放大倍率 $\beta = -20$ 。为了方便 Zemax 中的参数设置, 聚光镜组采用反转倒序的方式进行优化设计, 材料均采用石英。同样, 采用 RMS Spot Radius 优化函数作为优化依据对聚光镜组结构进行优化, 同时保证聚光镜组与子透镜的焦距匹配。图10为优化后的聚光镜组。再将聚光镜组与双排复眼透镜阵列进行整合优化配合, 完成科勒照明的光学结构设计, 如图11所示。

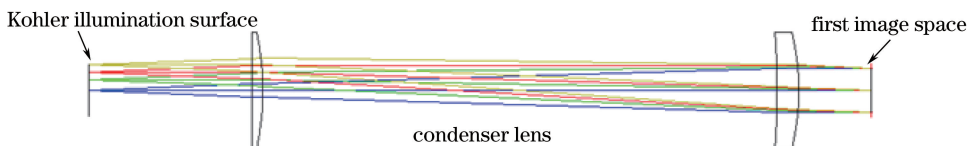


图10 倒序设计聚光镜组

Fig. 10 Reversely designed condenser lens set

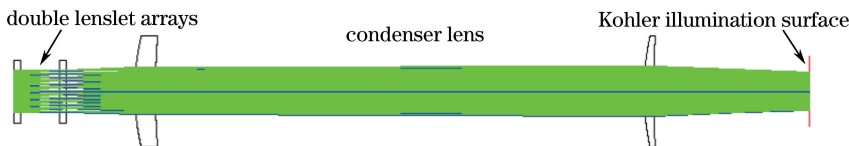


图11 双排子透镜阵列与聚光镜组构成科勒照明结构

Fig. 11 Kohler illumination structure consisted of double lenslet arrays and condenser lens set

4.2.3 双远心照明物镜组

在早期光刻机的照明系统中, 光源发出的光束经过复眼阵列和聚光镜后直接照射到掩模板上。在塔尔博特自成像光刻中, 一次对较大面积(60 mm \times 60 mm, 表1)的掩模板进行积分曝光是基本技术指标之一。掩模板面积增大, 照明系统光学元件尺寸也会随之增大, 这将会大幅增加元件的设计制造成本, 同时不利于球差、畸变等单色像差的校正。将双远心物镜组引入照明系统, 可以有效解决上述问题。另外, 双远心照明物镜组以科勒照明面为物面, 实际掩模面为像面, 构成一组共轭关系。将整个照明系统的视场光阑放置于科勒照明面, 可以更为精确地控制曝光场照明面积尺寸和照明均匀性。

根据表1中列出的照明指标, 双远心照明物镜组设计参数为: 物方视场 60 mm \times 60 mm, 物方数值孔径 $NA = 0.05$, 放大倍率 $-1\times$, 像方远心角 $< 0.5^\circ$, 光学材料悉数采用熔石英玻璃。基于上述设计参数, 在 Zemax 软件中建立双远心照明物镜组的光学结构, 如图12所示。该照明物镜组配合前序科勒结构进一步

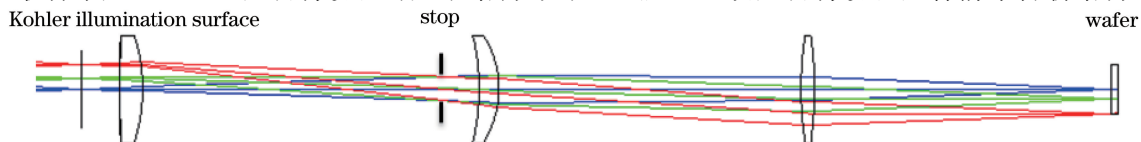


图12 双远心照明物镜组

Fig. 12 Dual-telecentric illumination lens set

优化,以 RMS Spot Radius 作为优化依据,并在优化的过程中严格控制放大倍率和像方远心角,使整个照明系统的畸变降低至 1% 以下,像方最大远心角约 0.4° 。图 13 为 Zemax 中完成优化设计的照明系统整体结构。

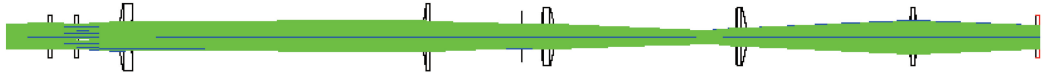


图 13 照明系统整体结构

Fig. 13 Integral structure of the illumination system

5 光线追迹仿真与结果分析

照明系统大规模光线追迹仿真在 Lighttools 软件中完成。该软件基于蒙特卡罗原理对光线进行追迹。对于设计的塔尔博特自成像光刻机照明系统,需设置上亿条追迹光线才能保证仿真结果与实际结果具有较高的一致性。本节主要从照明光功率密度、照明效率以及照明不均匀度等三个方面对仿真结果进行分析。

照明光功率密度定义为单位面积上的光功率,单位为 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$;照明效率 R 定义为照明面接收总能量 E_{receiver} 与光源发光总能量 E_{source} 之比,即 $R = E_{\text{receiver}}/E_{\text{source}}$;照明不均匀度为 $U = (I_{\text{max}} - I_{\text{min}})/(I_{\text{max}} + I_{\text{min}})$,其中 I_{max} 、 I_{min} 分别为照明面上最大与最小光强(光功率密度)。

依照第 4 节中 Zemax 优化设计结果,在 Lighttools 中建立光刻机照明系统追迹模型,如图 14 所示。为了使仿真结果接近实际情况,Lighttools 中主要参数按表 2 进行设置。利用 Lighttools 软件中特有分布式运算功能对照明系统进行大规模光线追迹,可以有效提高运算和仿真效率。

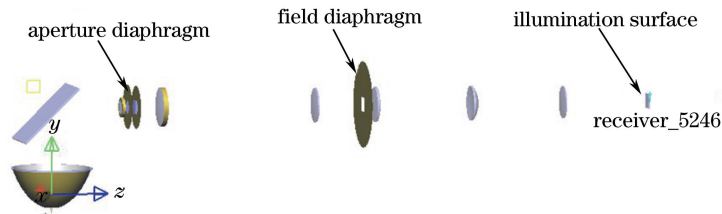


图 14 Lighttools 中建立塔尔博特自成像光刻机照明系统光线追迹仿真模型

Fig. 14 Ray tracing model established in Lighttools for illumination system in Talbot self-imaging lithographic equipment

表 2 Lighttools 主要参数设置

Table 2 Main parameters setting of Lighttools

Item	Wavelength /nm	Number of ray tracing	Illumination area /(mm×mm)	Number of mesh	Optical material	Reflectivity of reflecting element /%
Value	365±5	2×10^8	60×60	21×21	Silica	90

经过大规模光线追迹后,Lighttools 仿真结果如图 15 所示。在照明面积 $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 范围内,最大光功率密度 $I_{\text{max}} = 1.199\text{ mW}\cdot\text{mm}^{-2}$,最小光功率密度 $I_{\text{min}} = 1.156\text{ mW}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。由此可以计算出照明系统的照明不均匀度 $U \approx 1.826\%$ 。仿真结果满足表 1 中所列出的设计指标。

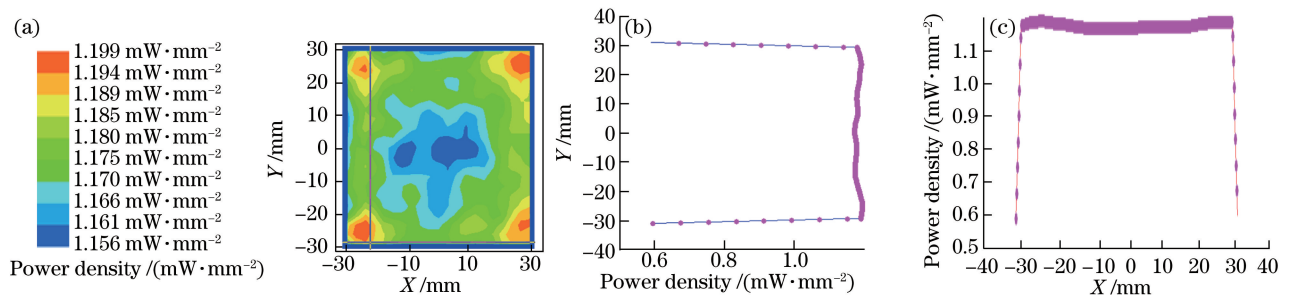


图 15 光线追迹仿真结果。(a)光功率密度分布图;(b)Y 截面分布;(c) X 截面分布

Fig. 15 Simulation result of ray tracing. (a) Distribution chart of light power density; (b) Y slice; (c) X slice

6 容差分析

根据塔尔博特自成像光刻原理,3个塔尔博特周期内的塔尔博特像和中间像可以通过扫描积分的方式在硅片上记录下来,即需要扫描积分的光轴方向距离 $\Delta Z = 6p^2/\lambda$ 。故塔尔博特自成像光刻照明系统需要保证以设计照明面为起点,在光束传播方向上 $[-\Delta Z, \Delta Z]$ 范围内光场的稳定性。由于一般用于塔尔博特自成像光刻的周期掩模图案特征周期 $p < 10 \mu\text{m}$,故 $\Delta Z < 2 \text{ mm}$ 。以图14为容差分析的初始结构,照明面以 0.4 mm 为间隔在光束传播方向 $[-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm}]$ 范围内进行重复光线追迹。追迹结果如图16所示,随着 ΔZ 不断增大,照明不均匀性也在不断上升。在 $\Delta Z = [0, 2] \text{ mm}$ 范围内,照明系统的最大不均匀度 $U \approx 1.853\%$,相对于初始位置不均匀度变化约 1.42% ;在 $\Delta Z = [-2, 0] \text{ mm}$ 范围内,照明系统的最大不均匀度 $U \approx 1.870\%$,相对于初始位置不均匀度变化 2.35% 。

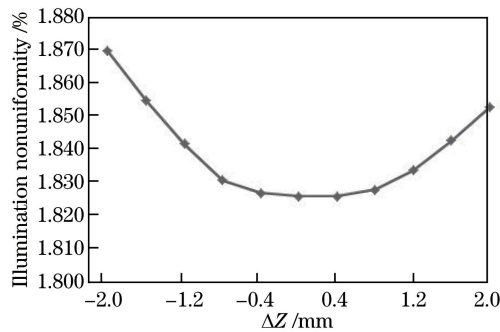


图16 照明面沿光轴方向位置变化 ΔZ 时的照明不均匀度

Fig. 16 Nonuniformity when the illumination plane moves by ΔZ along the optical axis direction

上述结果表明,照明面在沿光束传播方向附近 ± 3 个塔尔博特周期距离范围内,照明性能均满足表1中的设计指标,具有良好的稳定性和一致性。

7 结 论

通过结合成像光学理论和部分非成像光学理论,优化设计了一种适用于塔尔博特自成像光刻机的照明系统。利用Lighttools软件中的分布式运算功能对该照明系统进行了仿真分析和容差分析。仿真分析结果表明,该照明系统一次性曝光面积大,照明均匀性好,照明功率密度高。容差分析结果表明,在照明面附近 ± 3 个塔尔博特周期距离范围内,该照明系统的照明性能指标变化较小,均满足设计指标,具有较高的一致性和稳定性。总体而言,设计的照明系统能满足塔尔博特自成像光刻的技术需求。

参 考 文 献

- [1] Solak H H, Dais C, Clube F. Displacement Talbot lithography: A new method for high-resolution patterning of large areas[J]. Optics Express, 2011, 19(11): 10686-10691.
- [2] Solak H H, Ekinci Y. Achromatic spatial frequency multiplication: A method for production of nanometer-scale periodic structures[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2005, 23(6): 2705-2710.
- [3] Zhang Baohao, Zhou Sumei, Yang Xiaoming, *et al.* Talbot effect of square-aperture microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0523001.
张宝昊, 周素梅, 杨晓铭, 等. 方形孔径微透镜阵列的塔尔博特效应[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0523001.
- [4] Si Xinchun, Tong Junmin, Tang Yan, *et al.* Lithography alignment technology based on two-dimensional Ronchi grating[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0910001.
司新春, 佟军民, 唐 燕, 等. 基于二维Ronchi光栅的纳米光刻对准技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0910001.
- [5] Talbot H F. Facts relating to optical science No. IV[J]. Philosophical Magazine, 1836, 9(56): 401-407.
- [6] Yu Daoyin, Tan Hengying. Optical engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 二版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] Zhao Yang. Design of complex illumination optical system for deep ultraviolet lithography[D]. Changchun: Changchun

Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010: 21-22.

赵 阳. 深紫外光刻复杂照明光学系统设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010: 21-22.

[8] Welford W T, Winston R. The optics of nonimaging concentrators: Light and solar energy[J]. *Physics Today*, 1980, 33(6): 56-57.

[9] Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin, *et al.* Non-imaging optics and its application in solid state lighting[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(7): 963-971.

罗 毅, 张贤鹏, 王 霖, 等. 半导体照明中的非成像光学及其应用[J]. *中国激光*, 2008, 35(7): 963-971.

[10] Jin Ji, Yu Guiying, Lin Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(3): 680-684.

金 骥, 余桂英, 林 敏. 基于非成像光学的 LED 高收光率的抛物反射器研究[J]. *中国激光*, 2010, 37(3): 680-684.

[11] Ries H, Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces[J]. *Journal of The Optical Society of America A*, 2002, 19(3): 590-595.

[12] Xing Shasha, Ran Yinghua, Jiang Haibo, *et al.* Illumination mode conversion system design based on micromirror array in lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1111002.

邢莎莎, 冉英华, 江海波, 等. 基于微反射镜阵列的光刻照明模式变换系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1111002.