

光刻机照明光瞳测量用傅里叶变换物镜光学设计

蔡燕民 王向朝 步 扬 黄惠杰

中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

摘要 浸液光刻投影物镜的数值孔径目前已经达到 1.35, 这对与之匹配的照明系统光瞳测量提出了十分苛刻的需求, 为此设计了一种用于照明光瞳测量的傅里叶变换物镜。分析了傅里叶变换物镜应该满足的畸变要求, 并针对照明光瞳测量实际需求分析了傅里叶变换物镜的正弦条件偏离的阈值, 采用对不同视场角预留不同负畸变值的方法, 实现了一种傅里叶变换物镜光学设计, 采用 5 块透镜、1 种光学材料, 满足照明光瞳测量对正弦条件偏离阈值的要求, 成像质量接近衍射极限, 并对傅里叶变换物镜逆向光路也进行了分析计算。通过傅里叶变换物镜光学设计的具体实例, 证实了通过对不同视场角预留不同负畸变值设计方法的有效性, 利用该方法可以获得满足实际照明光瞳测量要求的傅里叶变换物镜。

关键词 光学设计; 成像系统; 傅里叶变换物镜; 正弦条件; 畸变

中图分类号 O439; TB851 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0416001

Optical Design of Fourier Transform Lens for Measurement of Illumination Pupil of Lithography Tools

Cai Yanmin Wang Xiangzhao Bu Yang Huang Huijie

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Numerical aperture (NA) of the projection objectives of the immersion microlithographic projection exposure machines has reached 1.35 and the measurements of the illumination pupil should meet very stringent requirements. A Fourier transform lens is designed and used for the measurement of the illumination pupil of the immersion microlithographic projection exposure machines. It is analyzed that the distortion of the Fourier transform lens should be negative, and the threshold of the deviation from the sine condition (DSC) of the Fourier transform lens is also analyzed on condition of the actual requirement of the illumination pupil measurement. The design method is that the different negative distortions are set on the different field of view (FOV) positions. We have worked out a Fourier transform lens with five elements and one kind of optical material and it meets the requirements of the DSC, wave front error, modulation transfer function (MTF) and distortion for the illumination pupil measurements of the immersion microlithographic projection exposure machines. It is also analyzed when the Fourier transform lens is used at inverse direction. It is confirmed that the design method that the different negative distortions are set on the different FOV positions of the Fourier transform lens is valid.

Key words optical design; imaging systems; Fourier transform lens; sine condition; distortion

OCIS codes 220.3620; 110.3960; 220.3740; 080.3620

1 引 言

目前的半导体前道光刻机, 采用氟化氙准分子激光和浸液光刻技术、偏振照明技术, 并配合多重曝光技术等多种分辨率增强技术, 已经实现 2X~1X nm 技术节点的量产。其中, 支持 2X nm 技术节点的典型设备是荷兰 ASML 公司的光刻机 TWINSCAN NXT:1960Bi 和日本 Nikon 公司的光刻机 NSR-S622D; 支持 1X nm 技术

收稿日期: 2014-11-11; 收到修改稿日期: 2014-11-28

基金项目: 国家国际科技合作项目(2011DFR10010)

作者简介: 蔡燕民(1971—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事投影光刻技术方面的研究。E-mail: caiyanmin@163.com

节点的典型设备是ASML公司的光刻机TWINSCAN NXT:1970Ci和Nikon公司的光刻机NSR-S630D,其中,NSR-S630D是支持10 nm节点量产的光刻机。这4种型号的光刻机都是采用数值孔径(NA)为1.35、放大倍率为-1/4倍的浸液投影物镜^[1],它们所要求匹配的照明系统像方数值孔径为0.3375(因为客户定制照明模式要求部分相干因子最大值为1)。

光刻机照明系统的光瞳特性决定了光刻图形的曝光质量,照明光瞳的形状、位置、能量分布、偏振态分布等参数对实现各种不同图形的精确曝光至关重要,没有照明光瞳的测量与控制,就没有合格的曝光图形。在光刻机中是采用一个针孔相机来测量照明系统的光瞳特性,其中,部分相干因子特性、光瞳椭圆度、光瞳极平衡性^[2]、偏振方向及偏振态分布^[3]等指标都需要在线测量。

傅里叶变换物镜结构形式很多,典型结构有2种^[4]。一种是单组形式,由正负2片透镜组成,它能使球差和正弦差得到很好的校正,但是轴外像差不能校正,因此能负担的视场和孔径都很小。另一种是由2组远距透镜组成,构成双远距对称结构(8片透镜),可以校正场曲,其他像差也可以得到很好的校正。但是这种物镜利用透镜间隔来校正场曲,因此结构不紧凑,轴向距离较大。

曾吉勇等^[5]公开一种应用于532 nm波长的傅里叶变换光学系统,公开4个实施例,其中第一实施例采用7块透镜、3种材料设计;第二实施例采用6块透镜、2种材料设计;第三实施例采用6块透镜、3种材料设计;第四实施例采用5块透镜、2种材料设计。曾吉勇等^[6]公开一种应用于532 nm波长的傅里叶变换光学系统,公开4个实施例,其中第一和第二实施例采用3块透镜、2种材料设计;第三和第四实施例采用4块透镜、3种材料设计。正弦差是表示小视场成像的宽光束的不对称性(即彗差)的度量,而傅里叶变换物镜的正弦条件是指在频谱面上像高度和视场角度的正弦值成正比。这两个发明专利认为正弦差较小就是满足了傅里叶变换物镜的正弦条件,这混淆了傅里叶变换物镜应满足的正弦条件和光学系统正弦差的概念;而且没有给出是否满足正弦条件的判据,即与正弦条件偏离的阈值数值。

关俊等^[7-9]分别公开了三种应用于632.8 nm波长,采用5块透镜、4种光学材料的傅里叶变换透镜,这3篇同一申请日的发明专利都给出了傅里叶透镜频谱面上谱点位置追踪结果及与正弦条件偏离的数值。其中文献[7]的表2计算了视场6、7、8的“与正弦条件偏离”分别为80、147、208.6 μm ;文献[8]的表2计算了视场6、7、8的“与正弦条件偏离”分别为50.02、74.12、90.45 μm ;文献[9]的表2计算了视场6、7、8的“与正弦条件偏离”分别为144.04、245.2、346.96 μm 。这表明该3篇发明专利的视场6、7、8的与正弦条件偏离相当大,其根本原因是畸变校正的问题。

针对某型光刻机照明光瞳测量系统的需求,同时为了克服上述诸多技术问题,本文提出一种应用于193.368 nm波长,采用5块透镜、1种光学材料的傅里叶变换物镜的光学设计,满足正弦条件偏离的阈值要求,成像质量接近衍射极限,另外还对傅里叶变换物镜的逆向光路进行分析和计算。

2 设计需求分析

针孔相机一般主要包括针孔掩模版、傅里叶变换物镜、像传感器等部件,如图1所示,针孔掩模版位于光刻机的掩模面位置,该位置就是投影物镜的物面位置,利用针孔通过移动掩模台来对不同照明视场位置进行采样测量。像传感器一般位于傅里叶变换物镜的频谱面位置,一般采用互补金属氧化物半导体(CMOS)相机或电荷耦合器件(CCD)相机作为像传感器。傅里叶变换物镜的功能是将通过针孔的照明光束角度分布转换为在频谱面上的空间分布,即在傅里叶变换物镜的频谱面获得照明光束的光瞳分布,可以表示为

$$h = f \sin \theta, \quad (1)$$

式中 h 表示在频谱面上的半高度, f 表示傅里叶变换物镜的焦距, θ 表示光束的半视场(FOV)角度(这也是物位于无穷远时的正弦条件)。在频谱面上获得照明光瞳分布的准确程度,依赖于傅里叶变换物镜对于正弦条件的满足程度,可见,傅里叶变换物镜是照明光瞳测量的关键部件,其性能决定了照明光瞳测量的精度。

普通物镜是根据理想光学系统理论进行设计,而傅里叶变换物镜与之不同,是根据衍射理论进行设计。傅里叶变换物镜对衍射光成像的特点,决定了其需要满足以下的设计要求^[4]:1)平行于光轴出射的主光线满足正弦条件;2)对二对物像共轭位置控制像差:第一对物像共轭位置满足物在无穷远,光阑在前焦面,像在后焦面;第二对物像共轭位置满足物在前焦面,光阑在后焦面,像在无穷远;3)消除单色像差,接近衍射

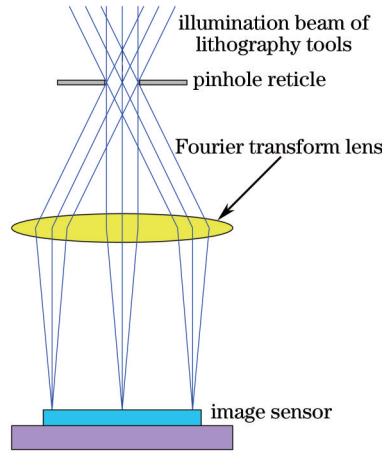


图 1 针孔相机示意图

Fig.1 Scheme of pinhole camera

极限,满足 Marechal 判据要求[波像差均方根(RMS)小于 71 mλ]。

某型光刻机对照明系统的部分相干因子提出要求:分辨率小于 0.002,均匀性不超过±0.003(3σ 值),重复性不超过±0.005(3σ 值),另外,部分相干因子的可调范围最小到 0.15。一般来讲,测量系统的精度应该小于被测对象技术指标的 1/3,这样确定测量部分相干因子的精度需要小于 0.002/3。而部分相干因子的定义为

$$\sigma = \frac{NA_{il}}{NA_{po}}, \quad (2)$$

式中 NA_{po} 表示投影物镜的像方数值孔径, NA_{il} 表示照明系统的像方数值孔径。

通过傅里叶变换物镜将照明系统的光瞳成像在 CCD 相机上,其光敏面尺寸就与测量部分相干因子的精度有关,并且决定了傅里叶变换物镜应该满足正弦条件到何种程度。由于所用 CCD 相机像面半高度为 4.096 mm,可以确定允许的正弦条件偏离(DSC)阈值为

$$V_{dsc} = 4.096 \text{ mm} \times 0.002 \times 0.15/3 \approx 0.4 \mu\text{m} . \quad (3)$$

设计傅里叶变换物镜所构成的针孔相机,测量的光刻机照明系统所匹配的投影物镜数值孔径为 1.35、放大倍率为-0.25、光源为氟化氩(ArF)准分子激光,波长为 193.368 nm,因此所有透镜全部采用高透射率的熔石英材料。傅里叶变换物镜的物方视场半角度要求计算如下(预留 10%的余量):

$$\theta = \arcsin(1.35/4 \times 1.1) = 21.8^\circ . \quad (4)$$

傅里叶变换物镜的频谱面尺寸要求为:CCD 相机的像素尺寸为 16 μm×16 μm,像素数为 512 pixel×512 pixel,像面尺寸为 8.192 mm×8.192 mm,像面半高度为 4.096 mm。这样要求傅里叶变换物镜的焦距为

$$f = \frac{h}{\sin \theta} = \frac{4.096}{\sin 21.8^\circ} = 11.0295 \text{ mm} . \quad (5)$$

另外,该针孔相机要求的针孔掩模版上针孔直径为 0.3 mm,从针孔面到像面距离小于 25 mm,像方工作距大于 4 mm。总结傅里叶变换物镜的设计需求如表 1 所示。

表 1 照明光瞳测量用傅里叶变换物镜设计需求

Table 1 Requirements of Fourier transform lens for illumination pupil measurement

Items	Specifications
Working wavelength	193.368 nm
Half angle FOV at the object side	21.8°
Radius at the image plane	4.096 mm
Pinhole diameter	0.3 mm
Focal length	11.0295 mm
Deviation from the sine condition	<0.4 μm
Wave front error (RMS)	<13.7 nm (71 mλ)
Imaging pixels of CCD	16 μm×16 μm
Working distance at image side	>4 mm
Distance from pinhole to image plane	<25 mm

3 傅里叶变换物镜光学设计

根据高斯光学理论,普通物镜的理想成像关系如下:

$$y = f \tan \theta, \quad (6)$$

式中 y 表示在高斯像面上的理想像高, f 表示物镜的焦距, θ 表示光束的视场角度。

普通物镜的主光线和高斯像面交点的实际高度并不等于理想像高,其差别就是物镜的畸变,理想像高是根据(6)式在高斯像面定义的。而傅里叶变换物镜需要满足(1)式,那么就不能同时满足(6)式,因为在一般物镜视场角范围内(小于 90°) $\sin \theta < \tan \theta$, 这样,设计傅里叶变换物镜时一定要保留负畸变。当傅里叶变换物镜的正弦条件偏离 DSC 为 0 时,根据(1)式和(6)式,傅里叶变换物镜的畸变如下:

$$\delta Y = h - y = f(\sin \theta - \tan \theta). \quad (7)$$

根据(7)式可以确定傅里叶变换物镜应该满足的畸变数值,例如,按照表格 1 中视场角和焦距数据,可以计算傅里叶变换物镜的畸变如图 2 所示。

采用对不同视场角预留不同负畸变值的方法,根据(7)式预先计算各视场角所要求的不同负畸变值,并按照上面表 1 的设计需求,设计了一种傅里叶变换物镜。根据初级像差理论^[4]确定物镜的初始结构,并参考几种傅里叶变换物镜^[10-11],然后通过 Code V 软件按照预留的不同负畸变值进行优化设计,同时对球差、彗差、像散、场曲、波像差进行约束,并且使各项参数满足上面设计需求(表 1)。通过优化设计,最后得到的傅里叶变换物镜的光路如图 3 所示,其中每一块透镜的具体设计参数如表 2 所示。

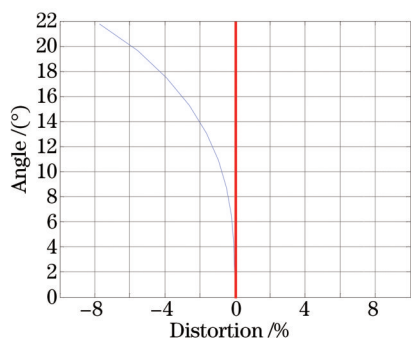


图 2 傅里叶物镜的畸变

Fig.2 Distortion of Fourier transform lens

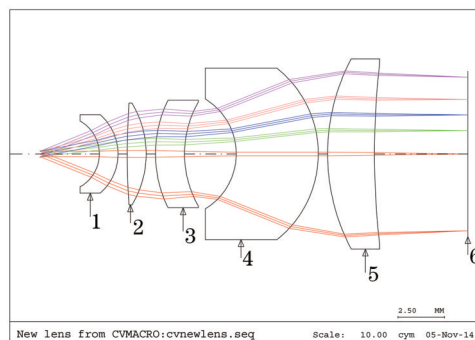


图 3 傅里叶变换物镜光路图

Fig.3 Layout of Fourier transform Lens

根据表 2 中的数据,采用 Code V 软件进行实际光线追迹得到不同视场角的实际像高,并与满足正弦条件的像高进行比较,如表 3 所示,可以看出,各视场位置实际像高与正弦条件的偏离都小于 $0.1 \mu\text{m}$ 。

表 2 每一块透镜的设计数据

Table 2 Design parameters of every lens

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi aperture /mm	Related objects
Object	1.00×10^{18}	1.00×10^{18}			Object plane
Stop	1.00×10^{18}	3.176317		0.150000	Stop plane
2	-2.011618	1.000000	Corning7980	1.247147	Lens 1
3	-2.778126	0.500000		1.697792	
4	42.939553	1.011073	Corning7980	2.160007	Lens 2
5	-5.210862	0.500000		2.260736	
6	6.459583	1.560038	Corning7980	2.401202	Lens 3
7	5.571694	2.770663		2.269657	
8	-3.416234	4.400359	Corning7980	2.425769	Lens 4
9	-5.828091	0.500000		3.969779	
10	10.804657	2.516950	Corning7980	4.436036	Lens 5
11	42.647032	5.002396		4.317894	
Image	1.00×10^{18}	0.000000		4.411485	Image plane

表3 实际像高与满足正弦条件像高的比较

Table 3 Actual image height compared with image height satisfied the sine condition

Half FOV /($^{\circ}$)	Height satisfied sine condition /mm	Actual image height /mm	Relative deviation	Absolute deviation / μm
0.00	0.000000	0.000000	--	0.000
2.18	0.419551	0.419550	-0.0003%	-0.001
4.36	0.838495	0.838500	0.0006%	0.005
6.54	1.256225	1.256230	0.0004%	0.005
8.72	1.672137	1.672140	0.0002%	0.003
10.90	2.085628	2.085630	0.0001%	0.002
13.08	2.496101	2.496090	-0.0004%	-0.011
15.26	2.902960	2.902930	-0.0010%	-0.030
17.44	3.305617	3.305570	-0.0014%	-0.047
19.62	3.703490	3.703420	-0.0019%	-0.070
21.80	4.096002	4.095920	-0.0020%	-0.082

光学系统的波像差和衍射调制传递函数(MTF)反映了各个像差对光学系统成像质量的综合影响,该傅里叶变换物镜的衍射调制传递函数如图4所示,其成像质量接近衍射极限。

图5是该傅里叶变换物镜的RMS波像差分布图,其中视场内最大RMS波像差为0.158 m λ ,即0.03 nm,这反映了傅里叶变换物镜的成像质量接近完善成像,满足 Marechal判据要求。

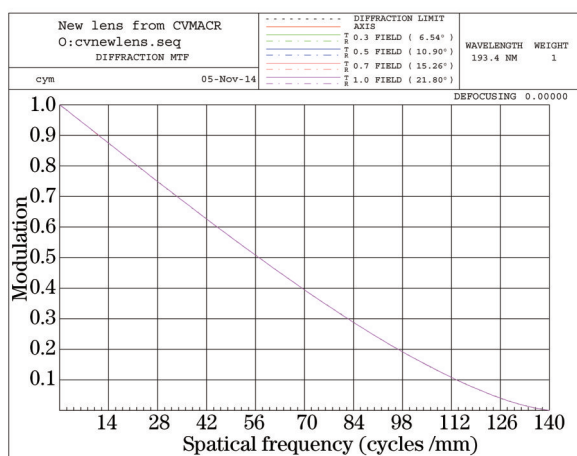


图4 傅里叶变换物镜调制传递函数

Fig.4 MTF of Fourier transform lens

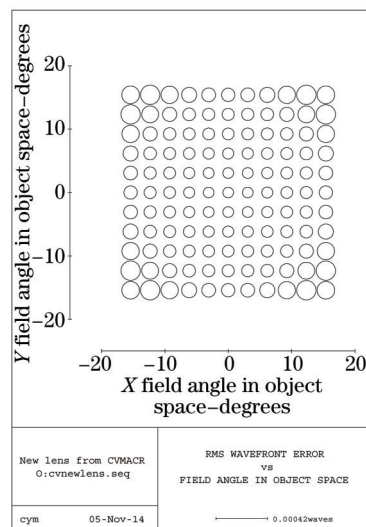


图5 RMS波像差

Fig.5 RMS wave front error

图6是傅里叶变换物镜的球差、像散、场曲、畸变图,其中球差最大值为5.9 μm ,场曲最大值为0.51 μm ,像散最大值为0.44 μm ,都是在像差容限之内。而相对畸变最大值为-7.15%,这是为了满足正弦条件要求设计预留负畸变而形成的。

从表2中数据可得,从针孔面到像面距离为22.938 mm,满足小于25 mm的要求。表2中第11面的数据为5.002396,由于它是凹面,用Code V计算净工作距为4.7832 mm,也满足像方工作距大于4 mm的要求。

所设计傅里叶变换物镜正向光路的F数为36.765,视场角 $2\omega = 43.6^{\circ}$,虽然光刻机照明光瞳测量仅用到傅里叶变换物镜的正向光路,但是,不妨也可以计算逆向光路的情况。逆向光路的计算就是将表2的数据倒转过来,从lens5向lens1计算。入瞳直径最大可以到1.5 mm,可以负担的F数为7.353,视场角 $2\omega=10.9^{\circ}$,像面高度 $2h=2.095$ mm,逆向光路的结构如图7所示。

图8是该傅里叶变换物镜逆向光路的衍射MTF,其成像质量接近衍射极限。图9是该傅里叶变换物镜逆向光路的RMS波像差分布,其中视场内最大RMS波像差为20.8 m λ ,即4 nm,这反映了傅里叶变换物镜逆向光路的成像质量接近完善成像,满足 Marechal判据要求。

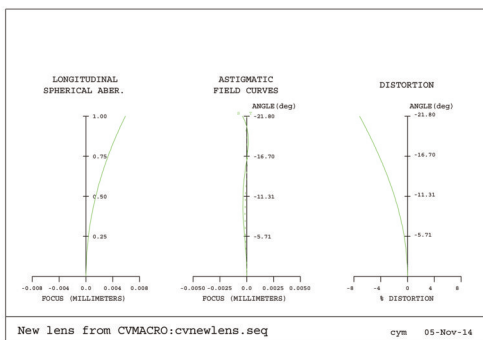


图6 傅里叶变换物镜的球差、像散、场曲、畸变曲线
Fig.6 Spherical aberration, astigmatism, field curvature, distortion of Fourier transform lens

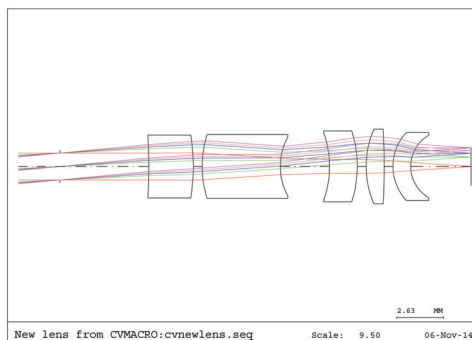


图7 傅里叶变换物镜逆向光路图
Fig.7 Layout of inverse Fourier transform lens

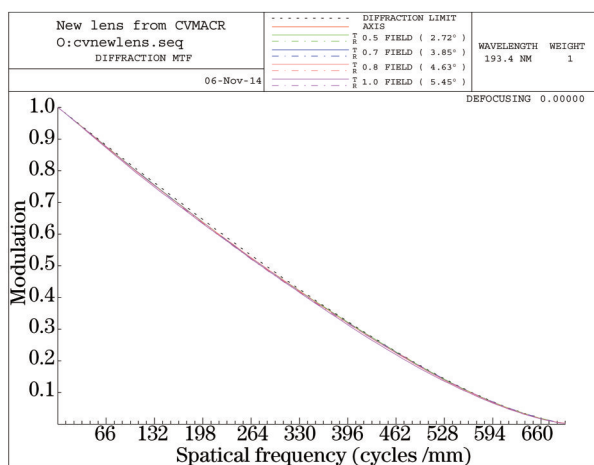


图8 傅里叶变换物镜逆向光路调制传递函数
Fig.8 MTF of inverse Fourier transform lens

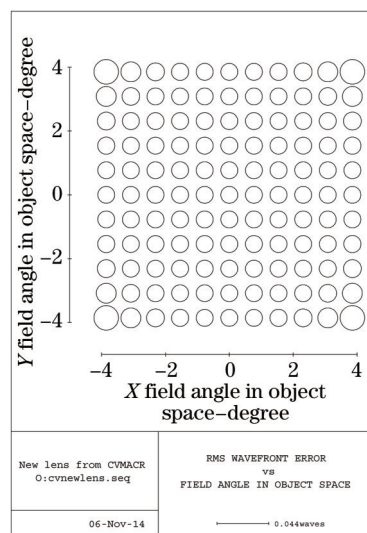


图9 傅里叶变换物镜逆向光路RMS波像差
Fig.9 RMS wave front error of inverse Fourier transform lens

根据表2中的数据倒转过来进行反向计算,采用Code V软件进行实际光线追迹得到不同视场角的实际像高,并与满足正弦条件的像高进行比较,如下表4所示,可以根据逆向傅里叶变换的实际要求(如DSC数值)来确定需要使用的视场角范围和F数范围(选取合适的入瞳直径)。

表4 逆向光路的实际像高与满足正弦条件像高的比较

Table 4 Actual image height compared with image height satisfied the sine condition

Half FOV / (°)	Height satisfied sine condition / mm	Actual image height / mm	Relative deviation	Absolute deviation / μm
0.000	0.000000	0.000000	--	0.000
0.545	0.104912	0.104910	-0.001%	-0.002
1.090	0.209814	0.209820	0.003%	0.006
1.635	0.314697	0.314720	0.007%	0.023
2.180	0.419551	0.419600	0.012%	0.049
2.725	0.524368	0.524480	0.021%	0.112
3.270	0.629137	0.629340	0.032%	0.203
3.815	0.733849	0.734210	0.049%	0.361
4.360	0.838495	0.839110	0.073%	0.615
4.905	0.943065	0.944060	0.106%	0.995
5.450	1.047550	1.049140	0.152%	1.590

4 设计结果

根据光刻机照明光瞳测量的实际需求,提出了一种傅里叶变换物镜的光学设计方法和设计结果,其设计结果汇总如表5所示,所有的设计结果都满足表1的设计需求,正弦条件偏离DSC、RMS波像差等都保留相当大的设计余量,结构尺寸也满足实际使用的要求。

表5 傅里叶变换物镜的设计结果

Table 5 Design results of Fourier transform lens

Items	Specifications	Design results
Working wavelength	193.368 nm	193.368 nm
Half angle FOV at the object side	21.8°	21.8°
Radius at the image plane	4.096 mm	4.096 mm
Pinhole diameter	0.3 mm	0.3 mm
Focal length	11.0295 mm	11.0295 mm
Deviation from the sine condition	<0.4 μm	-0.082 μm
Wave front error (RMS)	<13.7 nm (71 mλ)	0.03 nm
Imaging pixels of CCD	16 μm×16 μm	16 μm×16 μm
Working distance at image side	>4 mm	4.7832 mm
Distance from pinhole to image plane	<25 mm	22.938 mm

5 结 论

分析了傅里叶变换物镜应该满足的畸变条件,提出了一种采用对不同视场角预留不同负畸变值的傅里叶变换物镜设计方法,采用本方法并结合光刻机照明光瞳测量的实际需求,设计了一个满足成像质量、正弦条件偏离、实际使用等要求的傅里叶变换物镜,证实了设计方法的有效性。另外,对该傅里叶变换物镜的逆向光路也进行了分析和计算,给出了一般可使用的 F 数和视场。

参 考 文 献

- 1 Lü Bo, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of all spherical surfaces zoom lithographic system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0622001.
吕博,刘伟奇,康玉思,等.全球面变焦距光刻系统设计[J].光学学报,2013,33(6):0622001.
- 2 Rui Dawei, Shi Zhenguang, Yuan Wenquan, *et al.*. Pupil non-balance calibration for lithographic lens[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0916002.
芮大为,史振广,袁文全,等.光刻物镜光瞳极平衡性标定方法[J].中国激光,2014,41(9):0916002.
- 3 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Design of Wollaston prism used for polarization illumination system in ArF lithography tool[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0616002.
蔡燕民,王向朝,黄惠杰.用于ArF光刻机偏振照明系统的沃拉斯顿棱镜的设计[J].中国激光,2014,41(6):0616002.
- 4 Zhang Yimo. Applied Optics[M]. The second edition. Beijing: China Machine Press, 1988. 497-500.
张以谟.应用光学[M].第二版.北京:机械工业出版社,1988.497-500.
- 5 曾吉勇,金国藩,王民强,等.傅里叶变换光学系统及体全息存储傅里叶变换光学系统:中国,CN200510034757.3[P].2008-02-20.
- 6 曾吉勇,金国藩,王民强,等.非对称傅里叶变换光学系统及体全息存储光学系统:中国,CN200510034649.6[P].2009-07-22.
- 7 关俊.一种傅立叶透镜系统:中国,CN200810204353.8[P].2010-12-08.
- 8 关俊.低成本大数值孔径的傅立叶透镜系统:中国,CN200810204354.2[P].2010-04-21.
- 9 关俊,徐荣伟,葛贵臣,等.未采用非球面镜的傅立叶透镜系统:中国,CN200810204356.1[P].2012-05-30.
- 10 蔡燕民,王向朝.傅里叶变换物镜:中国,CN201310259300.7[P].2013-06-26.
- 11 蔡燕民,王向朝,唐锋.用于光刻照明系统光瞳测量的傅里叶变换物镜:中国,CN201410129663.3[P].2014-04-01.

栏目编辑:韩峰