

# i 线投影光刻曝光系统的 optical 设计

林大键 李 展 周崇喜

(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

**摘 要** 叙述具有同轴对准特性的光学投影物镜双远心结构和均匀照明光学系统原理。为了满足 i 线光刻所需的光学传递函数要求, 讨论了光刻分辨率和数值孔径的关系。设计了一种新的双远心投影物镜, 其数值孔径  $NA = 0.42$ , 放大倍率  $M = -1/5$ , 像场尺寸  $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  (直径  $21.2 \text{ mm}$ ), 共轭距  $L = 602 \text{ mm}$ 。

用光学设计程序 ZEMAX-XE 计算此 i 线物镜的像质。设计结果说明, 整个视场内波差  $< \lambda/4$ ,  $MTF > 0.55$ , 当空间频率为  $715 \text{ pair lines/mm}$ , 使用波长为  $365 \pm 3 \text{ nm}$  时。可以实现  $0.7 \mu\text{m}$  光刻分辨率。照明均匀器, 由 81 个小方型透镜组成一方列阵。用本文模拟计算软件 OPENG 计算被照像平面上的光能分布, 说明实际系统的照明不均匀性为  $\pm 2\%$ 。

**关键词** 光学设计, i 线镜头, 双远心, 均匀照明系统。

## 1 光学镜头的数值孔径 $NA$ 与分辨率 $R$ 的关系

投影光刻物镜具有衍射极限的成像质量, 整个视场内的波像差应小于四分之一波长。对于无像差的均匀照明圆孔径的光学系统, 其调制传递函数, 可表示为如下<sup>[1]</sup>。

$$MTF(\nu) = (2/\pi)(\Phi - \cos \Phi \sin \Phi) \quad (1)$$

式中  $\cos \Phi = \nu(\lambda/2NA)$

$$\nu = 1/2R \quad (2)$$

若要求  $MTF \geq 0.6$ , 则从(1)式就可以解得  $\cos \Phi \leq 0.32$ , 将其代入(2)式得

$$R = [1/(4 \cos \Phi)]\lambda/NA = 0.78\lambda/NA \quad (3)$$

本文设计 i 线镜头,  $\lambda = 365 \text{ nm}$ , 分辨率  $R = 0.7 \mu\text{m}$ , 则需要  $NA = 0.41$ 。实际光学系统有四分之一波差, 则此时光学系统的传递函数要下降,  $MTF \approx 0.50$ <sup>[2]</sup>。计算说明, 对于 i 线投影光刻物镜, 若需要光学系统传递函数  $\geq 0.50 \sim 0.55$ , 分辨率  $R = 0.7 \mu\text{m}$  时, 则光学系统的数值孔径  $NA \geq 0.41$ 。

## 2 投影光刻物镜双远心构成方法

最简单的双远心光学物镜, 可由两个透镜组构成, 如图 1 所示。光阑中心位于前组  $G_1$  的后焦点  $F_1$  和后组  $G_2$  的前焦点  $F_2$  处, 入瞳和出瞳均位于无限远处。光学系统的入射主光线和

出射主光线均平行于光轴。物点位于前组的前焦点  $F_1$  时, 光线在两组之间为平行光, 其像点落在后组  $G_2$  的后焦点  $F_2$ 。此光学系统称为傅里叶变换系统, 物的频谱面就在光阑面处。

此光学系统, 不但像面(硅片表面)离焦时, 而且物面(掩模图形面)有位移时, 光学系统的倍率  $M$  都可以保持不变。这点

对图形投影成像多次曝光光刻, 显得特别重要。同时也可以实现通过镜头掩模与硅片的同轴对准<sup>[3]</sup>。从图 1 的几何关系可以看出, 光学系统共轭距与倍率, 焦距有以下关系式

$$L = 2f_1 + 2f_2 = 2(1 - 1/M)f_2 \tag{4}$$

例如, 放大率  $M = -1/5$ , 共轭距  $L = 600 \text{ mm}$ , 则由(4)式得  $f_2 = 50 \text{ mm}$ 。从图中可知, 后组的视场角  $\omega$  有这样的关系式

$$\tan(\omega) = H_2/f_2 \tag{5}$$

对于像场尺寸一定时, 后组的焦距  $f_2$  越大, 视场角  $\omega$  越小, 则光学系统轴外像差就越容易校正。为了加大焦距  $f_2$ , 将前组  $G_1$  分成两组, 其中一组靠近物体(称为场镜), 另一组靠近光阑; 同样也将后组  $G_2$  分为两组, 一组靠近光阑, 另一组靠近像面。这样, 光学系统仍为双远心, 物点光经光阑也仍为平行光。如图 2 所示。

因为图 2 所示光学系统都由正透镜组成, 像面弯曲无法校正。为了校正场曲, 在系统中加上负透镜组, 使正负透镜分离, 光学系统作了相应的变化, 如图 3 所示。

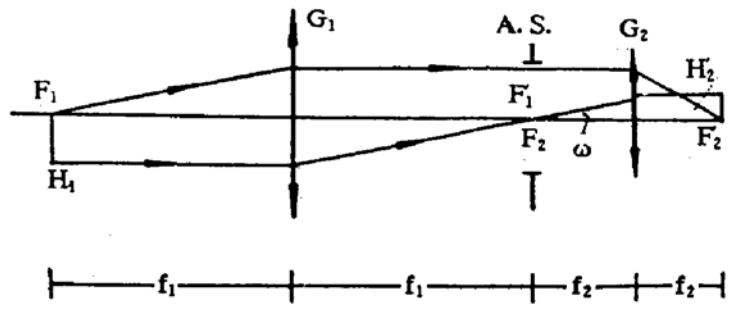


Fig. 1 Basic configuration of a double telecentricity lens

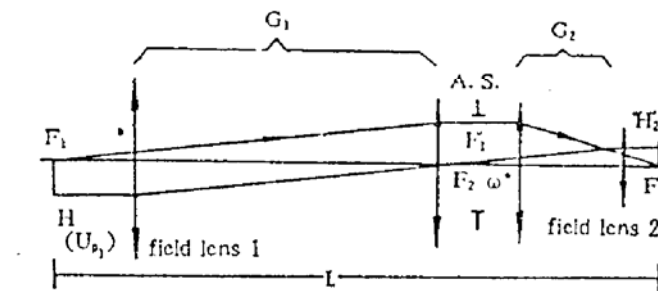


Fig. 2 Another configuration of double telecentricity lens

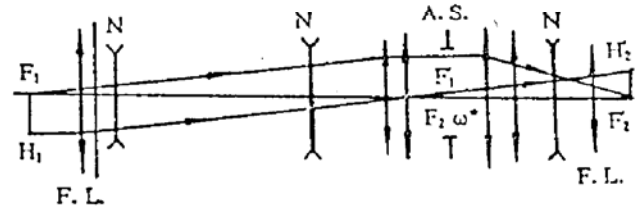


Fig. 3 Configuration of a double telecentricity lens with correcting petzval sum

光学系统仍然是双远心, 从物点发出的光仍然以平行光通过光阑。光学系统中加入负透镜, 可以使后组  $G_2$  的后主面和前组  $G_1$  的前主面近于光阑处。则(4)式可近似为

$$L \approx f_1 + f_2 = (1 - 1/M)f_2 \tag{6}$$

将  $M = -1/5$ ,  $L = 600 \text{ mm}$  代入(6)式, 得  $f_2 = 100 \text{ mm}$ 。这样, 后组的视场角  $\omega$  就降低一倍, 轴外像差就比图 1 所示的结构形式容易校正得多了。

### 3 一个设计结果

作为例子, 本文设计了一种适合于同轴对准, 双远心结构的  $i$  线投影光刻物镜。其数值

孔径  $NA = 0.42$ , 倍率  $M = -1/5$ , 像场尺寸  $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  (直径  $21.2 \text{ mm}$ ), 共轭距  $L = 602 \text{ mm}$ 。用光学设计软件 ZEMAX-XE<sup>[4]</sup>, 计算该镜头的光学成像质量。计算五个视场, 三个波长, 如图表。

object-side field No.	X (mm)	Y (mm)	weight
1	0	0	1.0
2	18.75	18.75	1.0
3	26.25	26.25	1.0
4	31.88	31.88	1.0
5	37.50	37.50	1.0
wavelength number	wavelength	weight	
1	0.366	1	
2	0.368	0.5	
3	0.363	0.5	

计算结果, 在全视场内, 最大波差小于四分之一波长, 对频率  $715 \text{ pair lines/mm}$  的光学调制传递函数大于  $0.55$ 。该镜头具有光刻  $0.7 \mu\text{m}$  线宽的能力。图 4 为场曲和畸变曲线图, 最大畸变小于  $0.08 \mu\text{m}$ 。图 5 为各视场的波差曲线, 最大波差小于  $\lambda/4$ 。图 6 为各视场的光学传递函数曲线图, 频率为  $715 \text{ pair lines/mm}$  时,  $MTF \geq 0.55$ 。

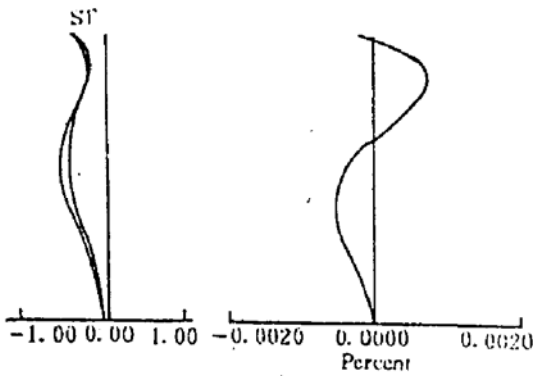


Fig. 4 Field curvature and distortion

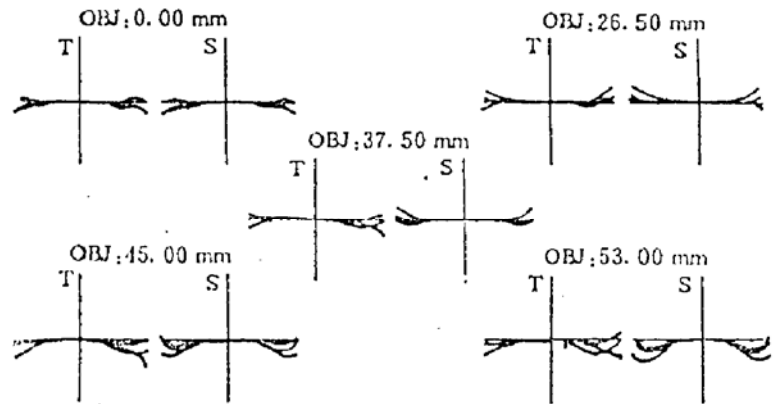


Fig. 5 Optical path difference

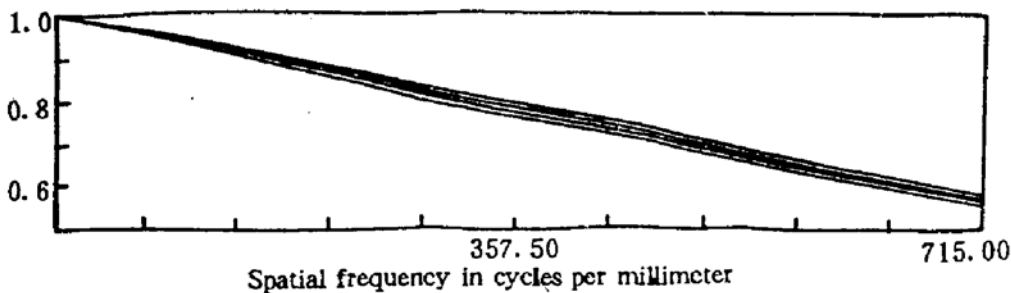


Fig. 6 Polychromatic diffraction modulation transfer function

## 4 均匀照明光学系统

高压汞弧灯为照明系统中的光源,如图 7 所示<sup>[5]</sup>。照明系统由椭球反射镜 2,冷光反射镜 3,聚光镜 5,紫外狭带滤光片 6,积分器 7,场镜 8,反射镜 9 以及聚光镜 10 所组成。光由椭球镜收集,经反射和准直后,照射到积分器上的光能分布是不均匀的。积分器是由许多小方块组成的一个列阵,它把整个光强分布分割成与积分器中的小透镜一样尺寸的部分,每一小部分都被其后的光学系统投影迭加到被照明的掩模面上。

光源的像在积分器的出端,(如图 8 所示)。经聚光镜 10 和投影光刻物镜的前组 G1,(如

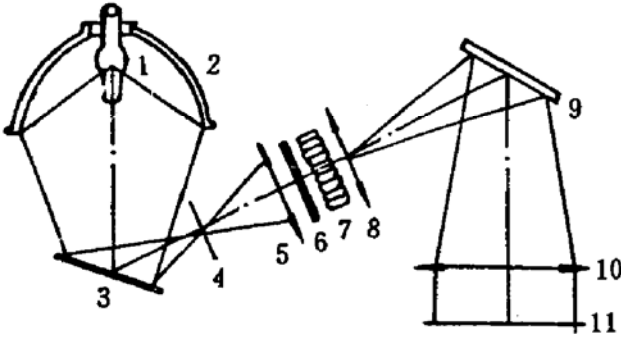


Fig. 7 Illumination system

Hg lamp 1, Ellipsoidal Mirror 2, Ultraviolet Mirror 3, Shutter 4, Collimator 5, Interference Filter 6, Integrator Lens 7, Field Lens 8, Mirror 9, Condenser Lens 10

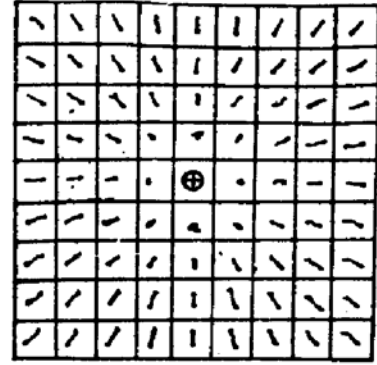


Fig. 8 The light source images on the exit of integrator lens

图 3), 成像于光栏 A. S. 处。其尺寸决定了光学系统部分相干系数。如果在积分器的出端放一挡光板,可以改变部分相干系数。本文所设计的积分器,由 81 个小方块组成,光学系统的相干系数在 0.7~0.5 之间。光源的相干性可以改变光学光刻分辨率,相干系数越小,光刻分辨率越高,所需要的曝光时间就越长。

本文作者编制了一个光能分布模拟计算软件 OPENG。用此软件计算被照像平面上的光强分布,计算结果说明实际系统照明不均匀性可达到 $\pm 2\%$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Warren, J. Smith, *Handbook of Optics*. Section 2, Mc Graw-Hill Book Company, 1978
- [2] Warren, J. Smith., *Modern Optical Engineering*. Section 2, Mc Graw-Hill Book Company, 1968
- [3] S. Willekock, et al., Deep-UV wafer stepper with through the lens wafer to Reticle Alignment. *Proc. SPIE*, 1990, 1264: 534~547
- [4] Focussoft, Inc, *Optical Design Program User's Guide*. Version 2.8 for DOS, 1993
- [5] Dajian Lin, *Engineering Optical System Design*. Mechanical Industry Publishing House, 1987, 243~246

## Optical Design of i-Line Stepper for Microlithography

Lin Dajian    Li Zhan    Zhou Chongxi

(*Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica, Chengdu, 610209*)

(Received 14 February 1994; revised 29 March 1994)

**Abstract** Double telecentricity configuration of optical projection lenses with alignment characteristic through optical axis and uniform illumination principle of optical system for microlithography are described. To meet requirements of optical transfer function (OTF) for i-line lithography, the relations between photolithographic resolution and numerical aperture (NA) are discussed. As an example, we designed a new double telecentricity projection lens with  $NA = 0.42$ , magnification  $M = -1/5$ , field size  $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$  (21.2 mm diameter) and conjugate distance 602 mm.

Optical design program ZEMAX-XE is used to calculate image qualities of the i-line lens. The calculating results indicate that the wavefront aberration  $< \lambda/4$  and  $MTF > 0.55$  across the entire field when spatial frequency is 715 lp/mm and using wavelength is  $365 \pm 3 \text{ nm}$ . That means the photolithographic resolution of  $0.7 \mu\text{m}$  could be realized. The illumination uniformizer consists of an array of 81 small square lens elements. The illumination uniformity of  $\pm 2\%$  could be realized by using our simulation program OPENG to calculate light intensity distribution on illuminated image plane.

**Key words** optical design, i-line lens, double telecentricity, uniform illumination system.