

两非球面反射镜非扫描式软 X 射线 投影光刻系统

潘君骅 朱永田

(中国科学院南京天文仪器研制中心, 南京 210042)

摘 要 提出一个软 X 射线投影光刻、缩比为 6·1、由两非球面镜构成的光学系统。该系统在波长为 13 nm 时, 可获得 $\phi 30$ mm 的平像场和优于 $0.1 \mu\text{m}$ 的光刻线条分辨率, 其最大畸变为 0.4%。

关键词 投影光刻, 非球面光学系统, 软 X 射线。

利用 KrF 或者 ArF 准分子激光的投影光刻技术, 能达到的分辨率大约是 $0.25 \mu\text{m}^{[1]}$, 要获得特征尺寸为 $0.1 \mu\text{m}$ 的器件, 可利用软 X 射线。波长为 13 nm 的正入射多层反射膜技术现已达到可实用的阶段, 国内已做到 50% 的反射率。所以, 设计全反射的, 分辨率达到 $0.1 \mu\text{m}$ 的投影光刻系统是目前此领域中极受关注的课题^[2]。无疑, 软 X 射线投影光刻系统反射镜的数目应尽可能少, 最好不多于两块。据知, 目前用于投影光刻的双反射镜系统有 Schwarzschild 的同心球面镜系统^[3]及 Kurihara 等提出的两镜系统^[4]。前者的主要困难在于像面弯曲, 只能做到在 $6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 像面范围内分辨率为 $0.16 \mu\text{m}$, 缩小比为 5 倍。它只能用来探索 X 射线投影光刻的可行性。后者的困难在于视场是弧带, 为了得到可用尺寸的视场, 必须以扫描方式进行投影光刻, 即物与像应严格同步运动。用三块镜子的系统则有三镜长型^[5], 三镜短型^[6]及倒 Baker 型^[7]等, 都仍是扫描模式工作的。Jewell 等介绍了两种非扫描模式工作的离轴或偏轴的四镜系统, 具有 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的视场及 $0.1 \mu\text{m}$ 的分辨率, 而其畸变可用模板的预畸变来补偿。总之, 迄今为止, 还没有见到两镜的非扫描投影光刻系统的设计。

1 消 S_{I} 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 的两镜系统

作者在 1965 年用三级像差理论对非球面两镜系统做了全面研究^[8], 得出一个有实焦点的, $S_{\text{I}} = S_{\text{II}} = S_{\text{III}} = S_{\text{IV}} = 0$ 的解。这是一组确定的解, 即其结构参数是不能随意改变的。该系统的主镜为凸面, 副镜为凹面, 副镜比主镜大 2.414 倍。物光束从副镜的中心孔穿过, 射到主镜上, 发散后经副镜聚焦, 并穿过主镜中心孔成像于主镜背后。主、副镜均为二次非球面。由于主、副镜中心均有孔, 故必须在物、像之间设置圆屏以挡住物方来的直射光线。

两镜系统的一般解, 是对平行光入射导出的。用在投影光刻上, 物距是有限的, 故解出

的结构必然需要调整。其次, 假如像方孔径角很大, 高级像差的影响就很明显, 要得到高的像质, 就必须加非球面高次项。这是作优化设计时需首先考虑到的。像方视场大小, 从投影光刻的生产性要求来看, $\phi 30$ mm 的圆视场是需要的, 放大倍率可在 $1/5 \sim 1/10$ 之间。关于物像共轭距离, 从系统的紧凑性考虑, 自然是愈短愈好, 但由于像方视场基本上是给定的, 缩短物距意味着增大像方角视场。所以, 实际上物像间距离是受两镜的像差校正能力限制。

减小几何像斑的目的是希望系统最后受衍射限制。对于一个没有中心遮拦的系统, 要使衍射分辨率达到 $0.1 \mu\text{m}$, 若 $\lambda = 13 \text{ nm}$, 其数值孔径(NA)有 0.08 就够了。但对于有中心孔的系统, 衍射分辨率是要降低的, 设计时一定要考虑到。还有, 投影光刻对视场照度的均匀性是有要求的^[9], 可通过选择遮光圆屏的最佳位置及尺寸, 使之在遮拦住直射光的同时, 能给出均匀的像面照度。

据以上的考虑, 设计了一个缩小 6 倍的, 由两个非球面反射镜组成的系统, 在 $\phi 30$ mm 的平像场内, 最大像斑尺寸为 $0.082 \mu\text{m}$, 工作相对口径为 $F/2.554 (NA = 0.196)$, 物像之间距离为 3082 mm。 $\lambda = 13 \text{ nm}$ 的衍射方波传函, 在 5300 l/mm 时为 0.502, 故分辨率可望达到 $0.094 \mu\text{m}$ 。几何传函在 9700 l/mm 时为 0.51。照度均匀性在 $\phi 30$ mm 视场范围内达到 $\pm 1.7\%$, 并还有可能再改善些。

系统的结构参数如下(单位 mm):

物距	主镜曲率半径	镜间距离	副镜曲率半径	总距离
- 3000	1752.447	- 1414.21	1744.818	3082.07

两镜的非球面参数及口径:

	二次项系数(k)	四次项系数(a)	口径(mm)
主镜	- 10.62914	4.707416×10^{-10}	190.3
副镜	0.1192335	$- 3.401078 \times 10^{-13}$	673.3

镜面方程式为: $Z = cr^2/[1 + \sqrt{1 - (K + 1)c^2r^2}] + ar^4$

其中 c 为顶点曲率。物方视场 $\phi 185.6$ mm, 像方视场 $\phi 30$ mm。圆屏的尺寸为 $\phi 38.1$ mm, 距离像面为 160 mm。该系统的轮廓图、点列图及方波衍射传函见图 1 至图 3。

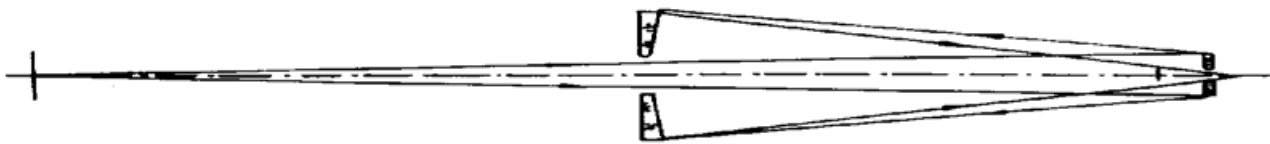


Fig. 1 Layout

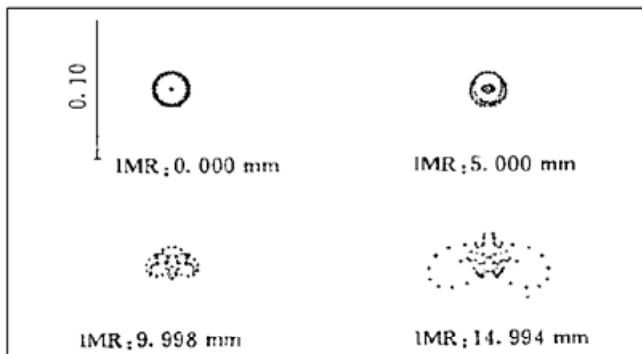


Fig. 2 Spot diagram

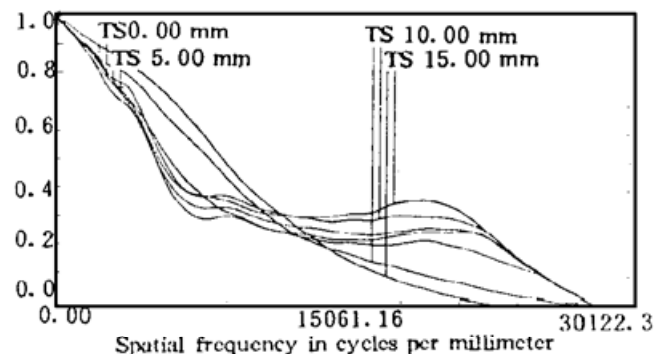


Fig. 3 Polychromatic diffraction square wave MTF

从计算数据中查得 5300 l/mm 时的方波传函大于 0.5, 对应的分辨率为 0.094 μm , 几何传函数则可达 0.74 以上。最大畸变为 0.04%。

2 讨 论

本系统的主要优点是有像质优良的较大平像场, 其主要缺点是总尺寸较长, 副镜尺寸较大及焦深较小。如果将物距改为 -2000 mm, 像方视场仍为 $\phi 30$ mm, 则衍射分辨率为 0.1 μm 时的方波传函降至 0.4。如将视场缩小至 $\phi 15$ mm, 物距亦缩短一半, 即为 -1500 mm, 则衍射传函基本不变, 即分辨率为 0.1 μm 时, 方波传函可大于 0.54。

关于反射镜表面精度要求, 则与系统的结构形式基本无关, 大致均要求 $\lambda = 632.8$ nm 时, $P-V$ 值在 $\lambda/400$ 左右。对于如此高的镜面精度要求, 检验系统的设计及误差的判读等均是工艺领域中的挑战性课题。作者初步设计过主镜的零位检验系统, 用了两片透镜及一个球面反射镜, 可以达到 $\lambda = 632.8$ nm 时剩余误差 $P-V$ 值为 $\lambda/5000$ 。

这个初步设计结果表明, 非扫描式软 X 射线投影光刻是有希望设计好的, 而且还可以根据总体要求再作进一步优化。

参 考 文 献

- [1] 冯伯儒, 光刻技术及其极限和发展前景. 光电工程, 1994, 21(2): 57~ 64
- [2] Tanya E. Jewell, J. Michael Rodgers, Kerin P. Thompson, Reflective systems design study for soft X-ray projection lithography. *J. Vac. Sci. Technol. (B)*, 1990, 8(6): 1519~ 1523
- [3] K. Schwarzschild, *Theorie der Spiegelteleskop. Astron. Mitth. Konigl Sternwarte zu Gottingen*. 1905, 10: 20~ 27
- [4] Kenji Kurihara, Hiroo Kinoshita, Tsutanic Mizota *et al.*, Two-mirror telecentric optics for soft X-ray reduction lithography. *J. Vac. Sci. Technol. (B)*, 1991, 9(6): 3189~ 3192
- [5] I. M. Egdall, Manufacture of a three-mirror wide-field optical system. *Opt. Engng.*, 1985, 24(2): 285~ 289
- [6] W. B. Wetherell, Daniel H. Schuite, David A. Womble, New optical configurations for wide-field telescopes. *Proc. Opt. and IR. Telescopes for the 1990s. II (Kitt Peak National Observatory)*, 1980: 878~ 895
- [7] I. R. Abel, M. R. Hatch, The pursuit of symmetry in wide-angle reflective optical design. *Proc. SPIE*, 1980, 237: 271~ 280
- [8] 潘君骅, 郝沛明, 两个二次曲面反射镜组成的光学系统的一般研究. 天文学报, 1965, 13(1): 46~ 56
- [9] 王之江, 邹海兴, 投影光刻机光学系统的总体设计. 光学学报, 1987, 7(2): 159~ 164

Two-Mirror Aspheric Optical System for Soft X-Ray Lithography with Nonscanning Mode

Pan Junhua Zhu Yongtian

(Nanjing Astronomical Instrument Research Center, Nanjing 210042)

(Received 15 January 1997; revised 3 March 1997)

Abstract A two-mirror aspheric optical system has been designed for soft X-ray reduction lithography. The designed optics achieves a defraction MTF value of over 0.5 at 13 nm wavelength and at a spatial frequency of 5300 lines/mm capable of resolving < 0.1 μm lines and spaces within a flat field of $\phi 30$ mm. The reduction ratio is 1/6, working $F/\#$ is 2.554 and the maximum distortion is 0.04%.

Key words projection lithography, aspheric optical system, soft X-ray.