

一种紫外或深紫外光刻的1:1折 反射式光学系统

鄢雨 邹海兴 王之江

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

设计了一种新的紫外或深紫外光刻物镜. 该物镜与国内外现有的紫外或深紫外光刻物镜相比, 既能满足大数值孔径的需要, 又能充分利用物镜的视场. 采用环形照明, 能缓解因增大数值孔径而使焦深缩短的矛盾.

关键词 紫外或深紫外光刻, 像差平衡, 调制传递函数, 拦光系数.

1 引 言

超大规模集成电路(ULSI)的迅速发展, 很大程度上归功于光学光刻技术的发展. 近年来, 软 X 光投影光刻(SXPL)技术已成为人们研究的热点, 并成功地进行了 $0.1 \mu\text{m}$ 的光刻^[1], 然而, 在软 X 光刻技术用于生产之前, 还有一系列技术难题需要进一步解决, 如全反射式光学系统、高反射介质膜、软 X 光源、以及软 X 光刻胶等. 紫外或深紫外光刻的研究, 并没有因软 X 光刻技术的出现而消失. 相移掩模^[2]、FLEX^[3] 和空间滤波^[4]技术的应用, 给紫外或深紫外光刻增添了新的活力, 并完成了 $<0.25 \mu\text{m}$ 的光刻^[5].

光学系统的极限分辨率 $R = k_1 \lambda / NA$, 式中 λ 为曝光波长, NA 为数值孔径, k_1 是与光刻胶材料、处理工艺和成像技术有关的系数. 对于给定的波长, 例如 KrF 准分子激光 ($\lambda = 248 \text{ nm}$) 光刻来说, 提高分辨率的有效途径是增大光学系统的数值孔径.

Markle-Dyson 系统^[6]的数值孔径可达到 0.7, 只可惜物像共面使视场的利用率不到 50%. Wynne-Dyson 系统^[7]采用了转向棱镜使物像分离, 严重的渐晕和棱镜内反射产生较大的位相差异(位相为角度的函数), 使得该系统的最大数值孔径极限为 0.5, 视场的利用率为 25%~35%. 因此, 研究一种新的物镜——既能满足大数值的需要又能充分利用视场是很有意义的.

2 新的光学系统和设计实例

图 1 是本文设计的新的光学系统的原理图. 两块厚度 d 相等的平行平板之间镀有半透半反膜, 并置于 Wynne-Dyson 系统中间, 主反射镜中心开孔, 系统中所有球面几乎共心, 成像光学系统为全对称结构, 照明系统采用临界照明.

2.1 平板厚度 d 的确定

大数值孔径的光学系统轴上点的球差除了初级球差外,还有孔径高级球差,如果只考虑到五级本征球差,轴上点的球差可以表达成^[8]:

$$\delta L = -\frac{1}{2n' \sin^2 U'} (\sum S_1 + \sum S_5), \quad (1)$$

式中 $\sum S_1 = \sum \tan i (i - i') (i' - u)$, $\sum S_5 = \sum \frac{1}{8} S_5 [(i' - u)^2 + (i' + u)^2 + (i + i')^2]$. $\sum S_1$ 为系统的初级球差系数, $\sum S_5$ 为系统的五级本征球差系数.

要求边光球差为零时,平板的厚度与物距有如下关系

$$2d = -\frac{n^2 n_p^3 (n^2 - 1)}{n_p^2 - 1} \cdot \frac{[1 + \frac{1}{4} NA^2 (1 + \frac{1}{n})^2 + \frac{1}{8} NA^2 (1 - \frac{1}{n})^2]}{[1 + \frac{1}{4} \frac{NA^2}{n^2} (1 + \frac{1}{n_p})^2 + \frac{1}{8} \frac{NA^2}{n^2} (1 - \frac{1}{n_p})^2]} l = -A l \quad (2)$$

式中, A 为系数, n 为平凸透镜的折射率, n_p 为平板的折射率, l 为物距. 此时, 0.7071 带剩余球差 δL_s 极大, 其大小完全由高级球差的大小决定, 且为高级球差的 1/4.

$$\left. \begin{aligned} \delta L_s &= \frac{1}{32} NA^4 \left[\left(\frac{1}{n^2} - 1 \right) M - \frac{A}{n^6 n_p} \left(\frac{1}{n^2} - 1 \right) M_p \right] l = -B l \\ M &= [2(1 + \frac{1}{n})^2 + (1 - \frac{1}{n})^2], \quad M_p = [2(1 + \frac{1}{n_p})^2 + (1 - \frac{1}{n_p})^2] \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, B 为系数. 为使波像差最小, 轴向离焦 $(3/4)\delta L_s$. 离焦后的剩余球差在最佳像面上产生的弥散斑半径为 $(3/4)\delta L_s U'$ 并满足

$$\frac{3}{4} \delta L_s U' \leq R. \quad (4)$$

由(2), (3)和(4)式得:

$$-l \leq \frac{4}{3} \frac{R^2}{B \cdot k_1 \cdot \lambda}. \quad (5)$$

$$d \leq \frac{2}{3} \frac{A \cdot R^2}{B \cdot k_1 \cdot \lambda}. \quad (6)$$

2.2 拦光系数 θ 的确定

拦光系数 $\theta = r_0/r$, r_0 为遮拦半径, r 为光瞳半径. 在理想光学系统中, 拦光系数 θ 增大时, 第一衍射暗环的半径缩小, 如用第一暗环半径计量分辨率, 则分辨率有所提高. 另一方面, 光瞳中心遮拦使像的中心核分布沿系统的轴线方向大约伸长 $1/(1 - \theta^2)$, 即焦深伸长 $1/(1 - \theta^2)$ ^[9]. 在实际光学系统中, 由于波像差的存在, 光学系统的传递函数应由下式求得:

$$OTF(\mu, \nu) = \frac{1}{S} \iint_{\Sigma} \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} [W(x + \mu/2, y + \nu/2) - W(x - \mu/2, y - \nu/2)] \right\} dx dy \quad (7)$$

式中, $S = OTF(0, 0)$ 为归一化因子, $W(x, y)$ 为光瞳上波像差函数, Σ 为图 2 所示的阴影部分. 通过对实际光学系统的数值计算, 可以确定

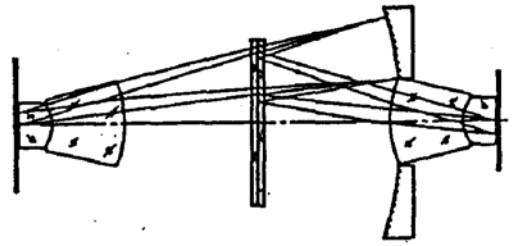


Fig. 1 New 1:1 catadioptric optical system

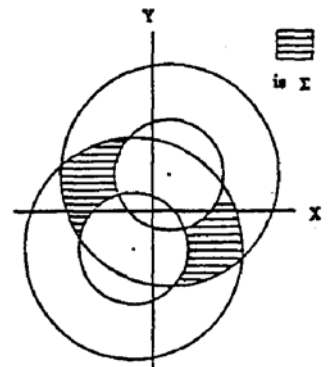


Fig. 2 Schematic of integrating region (Σ)

拦光系数 θ 的大小,使得有像差的实际光学系统的分辨率和焦深有所改善,调制传递函数 MTF 也不致于下降很大.

2.3 设计实例

Table 1. Parameter of lithography lens

magnification	1 : 1
laser wave length nm	248
bandwith nm	3
numerical aperture	0.4
field size mm ²	20 × 20
resolution μm	< 0.5
obscuration ratio	0.3
materials	CaF ₂ , fused silica

根据上述原理,设计了分辨率为 0.5 μm 的光刻物镜,其性能参数见表 1. 图 3 是该物镜的波像差曲线,图 4 是该物镜的调制传递函数曲线.

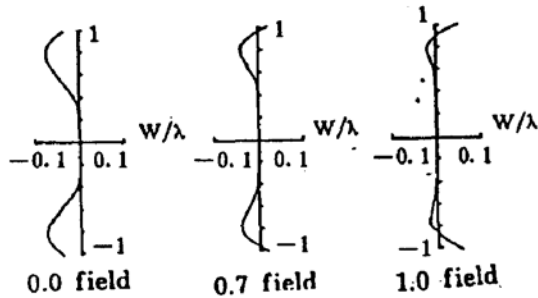


Fig. 3 Wave aberration curve ($\lambda = 248 \text{ nm}$)

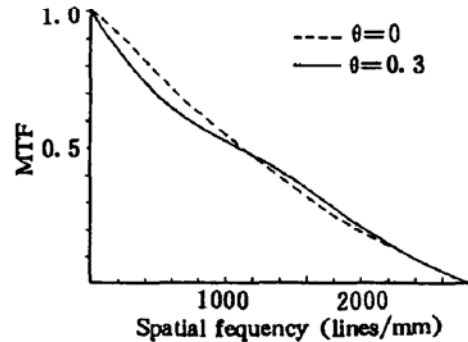


Fig. 4

3 结论和讨论

任意给定分辨率 R , 由(5)、(6)式可以确定物距 l 和平板的厚度 d ; 由光学系统的调制传递函数, 可以确定拦光系数 θ , 进而确定光刻物镜的视场. 这样设计出来的光刻物镜既能满足大数值孔径的需要, 又能充分利用物镜的视场, 采用环形照明还能缓解增大数值孔径而使焦深缩短的矛盾. 然而, 在分辨率很高, 数值孔径很大时, 轴上点的球差除了考虑初级球差和五级球差外, 还应考虑七级或更高级的孔径球差. 因此, (1)式所做的近似是不够的. 另外, 由(6)式可知, 分辨率 R 提高, 平板厚度 d 减小. 因此, 分辨率的极限主要受到平板加工的限制.

参 考 文 献

- [1] D. W. Berreman, J. E. Bjorkholm, L. Eichner *et al.*, Soft-X-ray projection lithography; printing of 0.2 μm features using a 20 : 1 reduction, *Opt. Lett.*, 1990, **15**(10) : 529~531
- [2] M. D. Levenson, N. S. Viswanathan, R. A. Simpson, Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask, *IEEE Trans. Electron Devices*, 1982, **ED-29**(12) : 1828~1836
- [3] H. Fukuda, N. Hasegawa, T. Tanaka *et al.*, A new method for enhancing focus latitude in optical lithography: FLFX, *IEEE Electron Device Letters*, 1987, **EDL-8**(4) : 179~180
- [4] H. Fukuda, T. Terasawa, S. Okazaki, Spatial filtering for depth of focus and resolution enhancement in optical lithography, *J. Vac. Sci. & Technol.*, 1991, **B(9)**(6) : 3113~3116
- [5] A. Greville, R. L. Hsieh, R. vonBunau *et al.*, Markle-Dyson optics for 0.25 μm lithography and beyond, *J.*

Vac. Sci. & Technol., 1991, **B(9)**(6) : 3108~3111

- [6] D. A. Markle, Unit magnification optical system with improved reflective retice, *U. S. Pat.* 5,040,882, Aug. 20, 1991
- [7] R. S. Herdhel, Optics in the model 900 projection stepper, *Proc. SPIE*. 1980, **221** : 39~43
- [8] 王之江, 光学设计理论基础, 北京, 科学出版社, 1965, 115
- [9] 包学诚, 桑胜泉, 阮银藩译, 显微镜的光学设计与计算, 北京, 机械工业出版社, 1982, 170~180

1 : 1 optics for UV or DUV lithography

YAN Yu ZOU Haixing WANG Zhijiang

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800*)

(Received 16 October 1992; revised 1 December 1992)

Abstract

The design of a new kind of UV or DUV lithography lenses is described in this paper. Compared with other UV or DUV lithography lenses, this lens can meet the needs of higher numerical aperture and full use of its field. Using the ring illumination, this lens can provide a solution for the contradiction of shortening DOF while enlarging NA.

Key words UV or DUV lithography, aberration balance, MTF, obscuration ratio.