

宽带折反射式紫外光刻物镜的设计

张雨东 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

本文设计了一种新系列的紫外或远紫外激光光刻物镜,它与国内外已有的紫外物镜相比,在 365 nm 以下的光谱区,具有更宽的光谱工作带宽和较高的数值孔径。以宽带准分子激光或短弧汞氙灯做光源,无需另加色散补偿光学元件,可以进行同轴对准。

关键词: 紫外和远紫外光刻,准分子激光光刻,亚微米光刻。

一、引 言

远紫外光刻,因其波长短,光谱功率强,具有生产率高的潜在优势,因而准分子激光光刻技术近年来成为光刻技术发展的热点。然而紫外光刻物镜的设计和制造非常困难。绝大部分厂家都仅用单一的熔石英制造物镜,其光谱工作带宽(以下简称带宽)变得非常狭窄(约 0.005 nm)^[1~4],从而导致严重的激光散斑,且窄带激光器造价昂贵,稳定性差,需要高精度的实时稳频伺服系统;光刻机系统也需要实时对焦伺服系统,系统造价高和维护使用困难。自 1986 年首次报道采用这种物镜的光刻机以来,已有多种型号样机问世,但这种窄带光刻机,迄今为止都只能在实验室内使用,见表 1。

Ultratech stepper 公司发展了一种 1:1 折反射式物镜(Wynne-Dyson 物镜),这种物镜具有结构紧凑,简单,传递信息量大的特点^[5]。表 2 给出了该公司制造的两种类型的物镜性能参数。

这种物镜的像差是由物/像面与透镜表面间的空气隙引入的^[6]。Wynne 建议在这空气隙处加入一块折射率和色散都比透镜高的平行平板来校正像差,如图 1 所示。

由空气隙引入的初级球差系数为:

$$S_1 = -\frac{(n^2 - 1)u_1 d_1}{n^3}, \quad (1)$$

其中, n 是图 1 中平凸透镜的折射率, d_1 是空气隙厚度, u_1 为入射光线孔径角。高级球差系数可写为

$$S_r = S_1 [(n+1)^2 + 2(n-1)^2] / 8, \quad (2)$$

初级色差系数为

$$C_1 = (n-1)u_1^2 d_1 / n^2 \nu, \quad (3)$$

其中, ν 是平凸透镜的阿贝数。

Wynne 建议的方法,因材料限制,在紫外与远紫外区,折射率与色散条件无法同时满

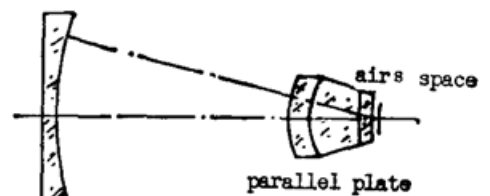


Fig. 1 Wynne-Dyson optical system

Table 1 Survey of excimer laser lithography

Manufacturer	Model	wavelength (nm)	reduction ration	NA	resolution (μm)	field Size (mm)	developed date & User
GCA (U. S. A.)	AWIS	248	10:1	0.3	0.5	10×10	1986
	ALS Laserstep	248	5:1	0.35	0.5	15×15	1987
	Autostep 200	248	5:1	0.44	0.45	15×15	1989
		193	10:1	0.35		ϕ 10	1987
ASM (Holland)		248	5:1	0.42	0.5	ϕ 21.2	1988
Nikon (Japan)	NSR 150 EX	248	5:1	0.42	0.5	15×15	1988.4
Cannon (Japan)		248	5:1	0.4	0.5	15×15	1988.6
Perkin-Elmer (U. S. A.)	Microscan I	248	4:1	0.35	0.5	20×32.5	1988, IBM, Illuminator of KrF excimer laser

Table 2 Parameters of laser lens

lens	No. 1	No. 2
magnification	1:1	1:1
numerical aperture	0.3	0.35
wave length (nm)	248, 193	248
band width (nm)	0.3	6
field size (mm)	ϕ 60	30×30
materials	fused silica, CaF ₂	fused silica, CaF ₂ , LiF ₂

足,使得物镜的光谱工作带宽变得很窄^[9]。由于光学材料的折射率差太小,空气隙厚度必须足够小,球差才能被校正。

二、新的光学系统

针对 Wynne-Dyson 物镜的局限性,本文设计了新的光学系统。具体做法是在 Wynne-Dyson 物镜中,在胶合镜与反射镜之间加入一块像差校正板。这块校正板可以是透明平行平板,也可以是至少一个面是球面的校正板。如图 2,图 3 所示。

当校正板为一平行平板时,只要校正板的厚度满足:

$$D = (n^2 - 1)n_s^3 \cdot n \cdot d_1 / (n_s^2 - 1). \quad (4)$$

其中, D 为校正板厚度, n_s 为校正板折射率,则初级球差被完全校正。由(2)式知,平板厚

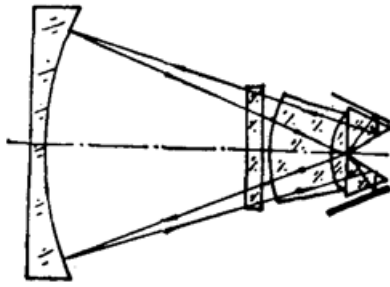


Fig. 2 New 1:1 catadioptric optical system with a corrective planoparallel plane

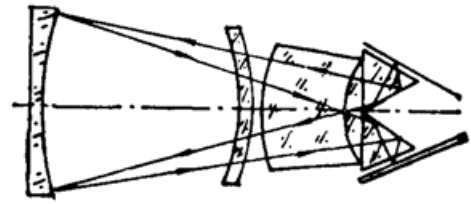


Fig. 3 New 1:1 catadioptric optical system with corrective lens

度比(4)式给出的略大,便可补偿高级球差。若平板的色散同时满足下式:

$$\nu_s = (n_s - 1) \nu \cdot D / (n - 1) n_s^2 d_{10} \quad (5)$$

其中 ν 是平凸透镜的阿贝数, ν_s 是平板的阿贝数。则色差也同时被校正。

如前所述,远紫外光谱区可用光学材料无法同时满足(4), (5)式。幸运的是平板产生的色差与空气隙引入的色差反号,所以色差可以适当补偿。实际设计中,获得了大约 10 nm 的工作带宽,如表 3 所示。这比 Ultratech stepper 公司所采用的三种材料制造的物镜带宽更宽。这物镜适用于宽带准分子激光做光源,甚至可以用短弧汞氙灯做光源^[8]。这种结构的物镜,其工作带宽还没有宽到可以使用同轴对准系统(波长为 550 nm)。要使物镜也适用于同轴对准系统,则物镜的工作带宽必须扩展到可见光谱区(光刻胶对可见光不敏感)。

Table 3 Parameters of laser lens

magnification	1:1
numerical aperture	0.4
wavelength (nm)	308
band width (nm)	10
field size (nm)	$\phi 40$
materials	fused silica CaF_2

如果校正板设计成至少有一个表面为球面,可以产生校正空气隙所引入的球差与色差的定量球差与色差修正值,则物镜带宽可以进一步展宽。可按如下公式设计校正板^[10]。

$$D = (\Delta - \nu c_2) / u(1 + \Delta - u), \quad r_1 = 1 / [1 - n / (n - 1)(1 - u)],$$

$$r_2 = (1 - u + \nu c_1)(n - 1) / (1 - u + \Delta)(nu - 1 - \Delta).$$

式中,长度变量以物距 l_1 归一化,角度变量以入射孔径角 u_1 归一化,即 $l_1 = 1, u_1 = 1, l_1 u_1 = 1$ 。以 u'_1 为参数,写作 $u; u'_2$ 写作 $1 + \Delta$,即 $\Delta = u'_2 - u_1$ 。 D 为校正板光轴方向厚度, r_1, r_2 分别为校正板前表面与后表面的曲率半径, c_1 为归一化后的空气隙产生的色差系数, ν 为校正板阿贝数。当给定 c_1, u, Δ 后即可算出 D, r_1, r_2 。若 u 选择适当,则球面校正板可以同时校正空气隙所引入的球差和色差,从而使物镜具有所需的工作带宽。对不同的 Δ 值,都能得到一个具有一定 r_1, r_2, D 的校正板,同时校正球差与色差。在空气隙 d 一定时,同一种光学材料,工作在同一光谱区,校正板的结构可以不同,因而可以得到一系列具有相同性能参数而结构参数不同的物镜。

要进一步增大物镜的数值孔径, 提高分辨率, 必须校正物镜的高级球差。高级球差与初级球差有如下关系^[10],

$$S_I = S_1 [(i+i')^2 + (i+u')^2 + (i-i')] / 8. \tag{6}$$

其中, i 是入射角, i' 是折射角, 又 $ni = n'i'$, $i = (h/r) - u$, 所以(6)式可写为

$$S_I \propto i^2 S_{10}. \tag{7}$$

所以, 对具有一定初级球差的校正板而言, 其高级球差决定于校正板两表面的曲率半径。在不同的 r_1, r_2 和 D 校正板中, 可选出一组具有合适的曲率半径, 使高级球差也同时被校正。从而可进一步扩大物镜的数值孔径。

在集成电路制造中, 除要求刻蚀细线条外, 还要求物镜有尽可能大的视场, 以满足芯片尺寸日益扩大和提高生产率的要求。扩大视场, 必须校正由校正板引入的像散。初级像散系数 S_3 为

$$S_3 = S_1 (i_p/i) S_{10} \tag{8}$$

式中 i_p 为主光线入射角, 二级象散为^[10]

$$0.5 S_3 (i' + i) i_p'^2 / (i' - u). \tag{9}$$

式中, i_p' 为 i_p 的折射角。由(8), (9)式可见, 只要 i_p 为零, 则校正板不引入象散, 从而使物镜具有最大的工作视场。校正板的曲率中心位于主反射镜顶点时, $i_p = 0$ 。

对任意选定的空气隙而言, $i_p = 0$ 与同时校正色差, 高级球差要求的校正板曲率是不同的, 但根据平凸透镜材料, 适当选取空气隙大小, 可以让 $i_p = 0$ 与校正高级球差所要求的曲率半径尽可能接近, 这样可兼顾物镜的高数值孔径和尽可能大的工作视场。

表 4 给出了两个设计实例的物镜性能参数。从表 4 中可见, 其中一个物镜的带宽扩展到可见光谱区。图 4 给出了该物镜的波像差曲线。

实验中, 采用了平行平板作为校正板的结构, 如图 2 所示, 性能见表 3。实验结果得到 $0.8 \mu\text{m}$ 等间隔线条。

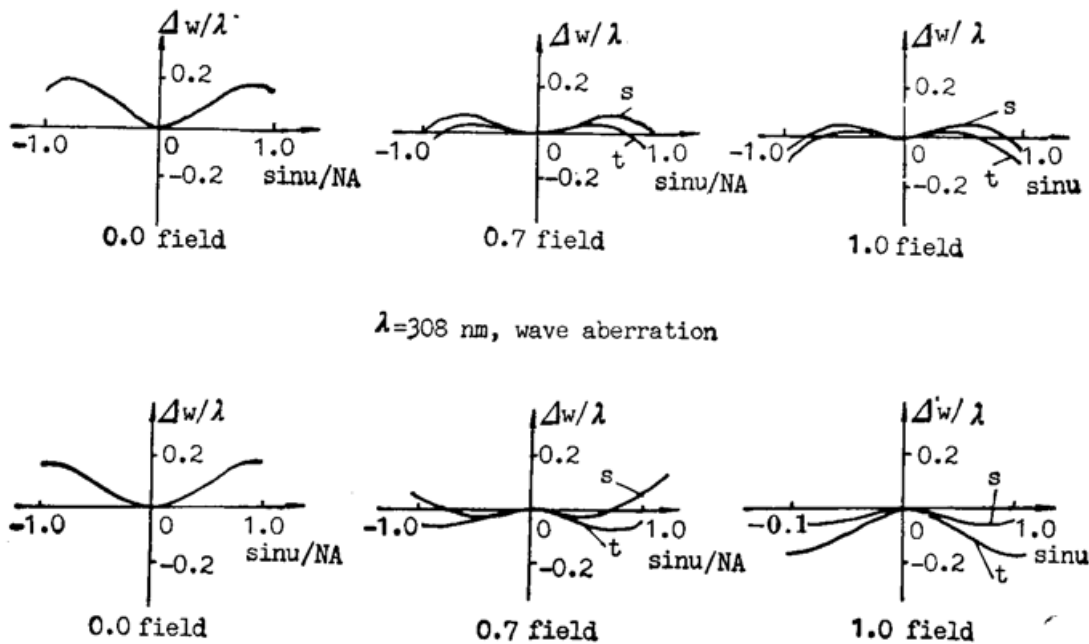


Fig. 4 $\lambda = 546 \text{ nm}$, Aberration Curve

w : wave aberration; λ : wavelength; NA: numerical aperture s : sagittal wave aberration; t : tangential wave aberration

Table 4 Parameters of laser lens

lens	No. 1	No. 2
magnification	1:1	1:1
numerical aperture	0.45	0.45
wave length (nm)	308	308
band width (nm)	28	546~308
field size (mm)	$\phi 58$	$\phi 58$
materials	fused silica, CaF_2	fused silica, CaF_2

三、结 论

由图 2, 图 3 可见, 该物镜结构简单, 紧凑, 易于制造, 并且这种新系统物镜可以在熔石英有效的所有光谱区使用。

由于物镜的工作带宽足够大, 可以使用光刻胶不敏感的可见光作同轴对准光源, 不必附加色散补偿元件。

宽带准分子激光或短弧汞氙灯均可作为该物镜的光源。这样可以避免窄带物镜带来的一系列问题, 如散斑问题, 窄带准分子激光器的脉冲稳定, 频率稳定的控制问题, 激光器可靠性问题, 激光波长漂移时实时自动调焦伺服控制问题等。从而大大简化了亚微米光刻系统, 降低了造价, 给准分子激光光刻实用性带来方便。因此, 这种实用化光刻物镜可用于亚微米和 $0.5\mu\text{m}$ 以下的光刻系统中。

参 考 文 献

- [1] Victor Pol, James H. Bennewitz *et al.*; *Proc. SPIE*, 1986, Vol. 633, 6
- [2] S. G. Olson, C. Sparkes; *Proc. SPIE*, 1990, Vol. 1264, 486.
- [3] R. F. Hollman, F. Cleveland *et al.*; *Proc. SPIE*, 1990, Vol. 1264, 548.
- [4] A. Tanimoto, A. Miyaji *et al.*; *Proc. SPIE*, 1989, Vol. 1088, 434.
- [5] J. D. Buckley, O. Karatzas; *Proc. SPIE*, 1989, Vol. 1088, 424.
- [6] A. C. Stephanakis, D. I. Rubin; *Proc. SPIE*, 1987, Vol. 772, 74.
- [7] F. N. Goodall, R. A. Lawes; *Proc. SPIE*, 1988, Vol. 992, 410.
- [8] B. Ruff, E. Tai *et al.*; *Proc. SPIE*, 1989, Vol. 1088, 441.
- [9] C. G. Wynne; *Opt. Engng.*, 1987, **26**, No. 4 (Apr), 300.
- [10] 王之江;《光学设计理论基础》, (科学出版社, 北京 1968), 273.

Broadband catadioptric UV lithography lenses design

ZHANG YUDONG, ZOU HAIXING, WANG ZHIJIANG

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica,*
P. O. Box. 800-216, Shanghai 201800)

(Received 21 March 1991; revised 20 May 1991)

Abstract

The design of a series of UV or DUV lithography lenses is described in this paper. Below 365 nm region, the bandwidth of these lenses is wider than that of abroad UV lithography lenses, and these lenses have higher NA also. The free-running (un narrowed) excimer laser or mercury-xenon short arc lamp can be used as illumination source, even the through-lens alignment system can be used in these lithography lenses.

Key words: lithography, DUV lithography, excimer laser lithography, submicron lithography.