

铜激光倍频光亚微米投影光刻系统的设计和实验研究*

黄惠杰 路敦武 杜龙龙 任虹 梁培辉

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 为了研究波长为 255.3 nm 的铜蒸气激光倍频光在亚微米光刻中的可行性, 设计了带宽为 1 nm 的 1:1 折反射式投影光刻物镜和一个带散射板的光管式均匀照明系统, 获得了 0.6 μm 的光刻分辨率。此结果表明, 铜激光倍频光可作为亚微米光刻的照明光源。

关键词 远紫外光刻, 亚微米光刻, 光刻物镜, 铜激光倍频光, 均匀照明系统。

1 引 言

由于 250 nm 波段远紫外光源的波长远小于常规高压汞灯的 i 线(365 nm), 且在此波段还有几种具有较高透过率和较好光学加工性能的光学晶体(如熔石英、 CaF_2 、 LiF 等), 因此这个波段的远紫外光源是亚微米和亚半微米光学光刻技术的首选光源^[1]。主要有两个途径可以获得该波段的远紫外光, 一是以输出波长为 248 nm 的 KrF 准分子激光为代表的激光光源, 这是八十年代以来人们研究的焦点, 已取得了令人满意的成果, 并日趋商品化^[2-4]; 二是二次激光类光源, 由常规激光的非线性效应获得, 如倍频、混频等。由 510.6 nm 的铜蒸气激光倍频获得 255.3 nm 的远紫外光源就是其中的一种^[5]。铜激光倍频已获得了很高的效率, 且与准分子激光相比, 它具有高重复频率(5 kHz)、窄线宽(0.02 nm)和输出波长稳定的突出优点。在实际应用中只需消除由其良好的空间相干性带来的散斑效应, 这种光源完全可获得与 KrF 准分子激光相同的光刻分辨率。

为了探索铜激光倍频光在亚微米光刻中的可行性, 本文设计了一套投影光刻系统, 其中包括一个由单一折射材料构成的 1:1 折反射式投影光刻物镜和一个能有效消除散斑效应的均匀照明系统, 并以此获得了 0.6 μm 的光刻分辨率, 从而表明铜激光倍频光在亚微米光刻中的可行性。

2 投影光刻物镜设计

在非相干照明条件下, 具有 $\lambda/4$ 波像差的投影光刻物镜, 当要求正弦波的调制传递函数(MTF)大于 0.5 时, 物镜的光刻分辨率(即线宽)和数值孔径 NA 的关系如下^[6, 7]:

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1996 年 1 月 24 日; 收到修改稿日期: 1996 年 3 月 25 日

$$R = 0.78\lambda/NA \quad (1)$$

计算表明,对于高分辨率光刻物镜,当正弦波调制传递函数为 0.5 时,方波调制传递函数可达到 0.6。光刻机均采用方波掩模。而实际光刻工艺要求物镜的方波调制传递函数大于 0.6,才能经合适的曝光、显影后得到满意的适合后道工序的光刻线条。所以设计物镜时,根据分辨率要求按(1)式即可确定物镜相应的 NA 。对于铜激光倍频光, $\lambda = 255.3 \text{ nm}$, 当要求光刻分辨率 $R \leq 0.7 \mu\text{m}$ 时, $NA \geq 0.3$ 。在本设计中,取 $NA = 0.32$ 。

由于 1·1 折反射式物镜的结构简单,色差校正范围宽,造价低,实用性强,所以作者采用这种结构形式的投影光刻物镜。Dyson 发明了一种 1·1 折反射式物镜^[8],如图 1 所示,它由一个平凸半球透镜和一个球面反射镜组成,两个球面同心,且平凸透镜的球面半径 r 和球面反射镜的半径 R 之间满足如下关系:

$$R/r = n/(n - 1) \quad (2)$$

式中 n 为平凸透镜的折射率。这样,反射镜位于平凸透镜的焦点处,构成双远心光路,平凸透镜的厚度等于其球面半径。实际使用时,物/像面与平凸透镜平面间的空气间隙在整个视场内引入的一致球差和色差,可在平凸透镜和球面反射之间加入一块适当厚度的平行平板来校正^[9]。根据上述原理,作者设计了一个如图 2 所示的投影光刻物镜,其性能参数见表 1。

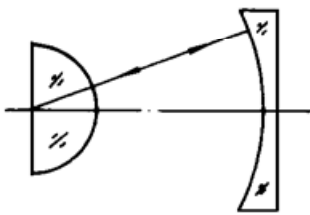


Fig. 1 1·1 Dyson lens

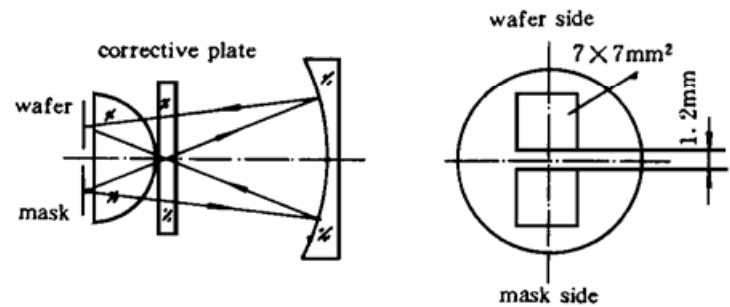


Fig. 2 New 1·1 catadioptric lens and its field layout

结果表明,采用单一熔石英材料作折射元件,在 254.8~255.8 nm 的带宽内,整个视场的波像差小于 $\lambda/4$,达到瑞利衍射极限像质。图 3 给出在非相干照明条件下物镜的方波调制传递函数。在计算整个带宽的调制传递函数时,三种波长的权因子均取为 1。从图 3 可见,对于 0.625 μm (对应于 800 cycles/mm)的光刻分辨率,物镜在三种波长和整个带宽的调制传递函数均大于 0.6。所以该物镜完全适用于波长为 255.3 nm、带宽为 0.02 nm 的铜激光倍频光的亚微米光刻要求。

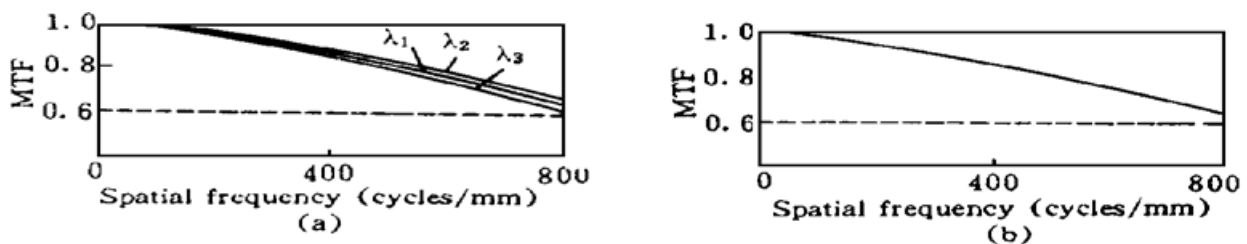


Fig. 3 Square wave MTF for incoherent illumination

(a) Monochromatic MTF, $\lambda_1 = 255.3 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 254.8 \text{ nm}$, $\lambda_3 = 255.8 \text{ nm}$, (b) Polychromatic MTF $\lambda = 255.3 \pm 0.5 \text{ nm}$

Table 1. Parameters of lithography lens

magnification	1·1
numerical aperture	0.32
central wavelength (nm)	255.3
bandwidth (nm)	254.8~ 255.8
resolution (μm)	0.7
field size (mm^2)	7×7
refractive material	fused silica

3 照明系统设计

对于亚微米光刻来说, 照明系统通常需满足^[6, 7]: 1) 照明面的光强分布不均匀性应小于 $\pm 2\%$; 2) 部分相干度 $\sigma = 0.6 \sim 0.8$, 这不仅可以充分利用照明光能, 而且还可改善工作线宽的频率传递特性, 即提高线条轮廓的边缘陡度。对于具有良好空间相干性的铜激光倍频光来说, 影响照明均匀性的主要因素还有散斑效应。空间相干性与光源的尺寸有关, 如加大光源尺寸, 使光源上每一点发出的光经照明系统后在物面上各形成一组散斑, 则各组散斑可因相互叠加而抵消, 从而得到均匀的照明面。为此可在照明系统中引入散射板(毛玻璃), 并使其在曝光过程中不停地转动或移动, 或是让照明光点在物镜光瞳面上扫描^[10, 11]。

基于上述讨论, 作者设计了如图 4 所示的照明系统。铜激光 B_1 (510.6 nm) 经柱面镜 1 在 BBO 倍频晶体上形成线焦斑, 以利于提高倍频效率^[5]。由 BBO 晶体射出的光束被柱面镜 2 准直, 经石英分光棱镜后, 被分为按不同方向传播的基频光 B_2 和倍频光 B_3 (255.3 nm)。转动的散射板和光管的作用是把高空间相干性的入射光 B_3 分割成许许多多的点光源, 并最终在光管末端相互叠加而形成无散斑的均匀照明面, 这个均匀照明面再经场镜和聚光镜成像到掩模面。照明系统的数值孔径为 0.22, 则部分相干度 $\sigma = 0.7$ 。

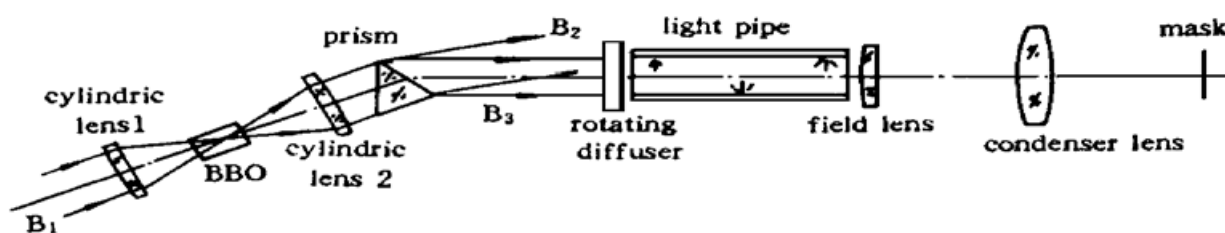


Fig. 4 Schematic illustration of illumination system

4 实验研究

首先对散射板的消散斑效果进行了研究。当散射板不停转动时, 整个视场的散斑被完全消除, 并可分辨出线条。图 5 给出了两种情况下硅片胶层上的部分散斑图样。其中, (a) 为散射板在曝光过程中静止不动, (b) 为散射板在曝光过程中不停转动。

作者进行了亚微米光刻研究。经试刻, 获得了 $0.6 \mu\text{m}$ 的光刻分辨率, 如图 6 所示。表 2 给出了光源参数及实验条件。

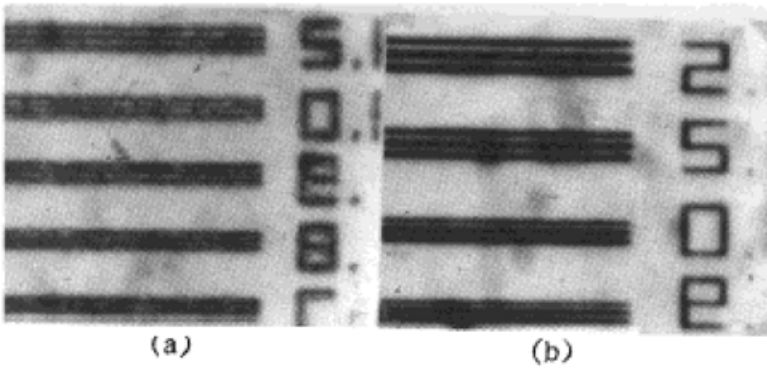


Fig. 5 Photographs of speckle pattern in resist

(a) with a stationary diffuser, (b) with a rotating diffuser

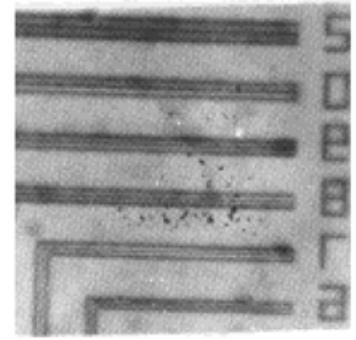
Fig. 6 Photograph of 0.6 μm line/space patterns in resist

Table 2. Parameters of light source and resist process

light source	second-harmonic light of CVL at 510.6 nm
wavelength	255.3 nm
bandwidth	0.02 nm
repetition rate	5~6 kHz
power at diffuser	300 mW
power density at mask	30 mW/mm ²
illumination uniformity	$\pm 2\%$
resist	AZ1350
resist thickness	0.6 μm
power density at wafer	7.5 mW/mm ²
exposure dose	200 mJ

结 论 采用转动散射板方法有效消除了散斑效应; 实验得到了 0.6 μm 的光刻分辨率, 这表明光刻系统的设计是达到要求的, 也肯定了铜激光倍频光在亚微米光刻中的可行性。作者认为, 只要进一步提高光源输出的稳定性和倍频效率, 则铜激光倍频光在光学光刻技术中完全具有与 KrF 准分子激光同样的应用前景。

参 考 文 献

- [1] V. Pol, J. H. Bennowitz, G. C. Escher *et al.*, Excimer laser-based lithography: a deep ultraviolet wafer stepper. *Proc. SPIE*, 1986, **633**: 6~16
- [2] F. N. Goodall, R. A. Lawes, Excimer laser lithography with 1 "1 Wynne-Dyson optics. *Proc. SPIE*, 1988, **922**: 410~416
- [3] M. Kameyama, K. Ushida, Excimer laser stepper for submicron lithography. *Proc. SPIE*, 1987, **774**: 147~154
- [4] H. J. Jeong, D. A. Markle, G. Owen *et al.*, The future of optical lithography. *Solid State Tech.*, 1994, **37**(4): 39~47
- [5] 任虹, 梁倍辉, 路敦武等, 高效铜激光倍频及在光刻中的应用. *中国激光*, 1995, **A22**(1): 9~12
- [6] 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
- [7] 林大键, 李展, 周崇喜, i线投影光刻曝光系统的光学设计. *光学学报*, 1995, **15**(3): 347~351
- [8] J. Dyson, Unit magnification optical system without Seidel aberration. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, **49**(7): 713~716

- [9] Zhang Yudong, Zou Haixing, Wang Zhijiang, A new family of 1 ·1 catadioptric broadband deep UV high NA lithography lenses. *Proc. SPIE*, 1991, **1463** : 688~ 694
- [10] W. N. Partlo, C. A. Spence, W. G. Oldham, Effects of line narrowing and collimation on excimer radiation at 248 nm. *Proc. SPIE*, 1989, **1088** : 448~ 461
- [11] Y. Yoshitake, Y. Oshida, T. Tanimoto *et al.*, Multispot scanning exposure system for excimer laser stepper. *Proc. SPIE*, 1991, **1463** : 678~ 687

Submicron Projection Lithography with Second-Harmonic Light of Copper Vapor Laser

Huang Huijie Lu Dunwu Du Longlong
Ren Hong Liang Peihui

(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

(Received 24 January 1996; revised 25 March 1996)

Abstract In order to study the feasibility of submicron lithography using second-harmonic light of a copper vapor laser(CVL), a 1 ·1 catadioptric projection lens, and an illumination system which consists of a rotating diffuser and a light pipe, are designed and constructed. A resolution of 0.6 μm line/space patterns is produced in AZ1350 resist. The result shows that the second-harmonic light of CVL can be used as an illumination source in submicron lithography.

Key words DUV lithography, submicron lithography, lithography lens, second-harmonic light of CVL, uniform illumination system.