

# 全球面变焦距光刻系统设计

吕 博<sup>1,2</sup> 刘伟奇<sup>1</sup> 康玉思<sup>1</sup> 冯 睿<sup>1</sup> 柳 华<sup>1</sup> 魏忠伦<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 设计了一种采用全球面透镜并具有变焦距功能的光刻系统。系统具有 4 个机械变焦的位置, 两片负透镜作为变倍组, 两片正透镜作为移动补偿组, 补偿在变焦过程中由于系统共轭距离变化造成的像面移动。该系统光学总长为 653.67 mm, 系统采用的 22 片透镜元件, 全部采用球面设计, 同时系统中没有使用特种光学玻璃。该系统工作在光刻常用波长 405 nm 下, 其 500 lp/mm 调制函数值在 4 个变焦位置和所有视场内均大于 0.40, 绝对畸变小于六分之一特征尺寸。设计结果表明该系统成像效果良好, 制作成本低, 适用于工作在刻蚀微米量级分辨率、变焦距双远心光刻系统中。

**关键词** 光学设计; 变焦距光学系统; 光刻物镜; 球面设计

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0622001

## Design of All Spherical Surfaces Zoom Lithographic System

Lü Bo<sup>1,2</sup> Liu Weiqi<sup>1</sup> Kang Yusi<sup>1</sup> Feng Rui<sup>1</sup> Liu Hua<sup>1</sup> Wei Zhonglun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** A zoom functional optical lithography system with all spherical surfaces is designed. The system can automatically realize four zoom positions, and is comprised of two negative lens working as zoom group, two positive lens working as compensatory group to compensate the image surface shift induced by the conjugate distance change during the zooming motion. The system has an optical length of 653.67 mm with 22 pieces of lens. All the components are spherical surface and no special glass is employed. Under the 405 nm working wavelength, the modulation transfer function of this up-to-date lens is greater than 0.4 with 500 lp/mm at all four zooming positions and field of view and the absolute distortion is less than one sixth characteristic dimension. The result illuminates that the lens system design meets the requirement of good image quality and low cost for manufacture, and it can be applied in micrometer solution zoom optical lithography system.

**Key words** optical design; zoom optical system; lithographic lens; spherical-surface design

**OCIS codes** 080.3620; 110.3960; 120.3620

## 1 引 言

近几十年来, 半导体工业的快速发展推动着其中作为核心制造元件光刻物镜<sup>[1~6]</sup>的发展。国外光刻技术研究开展得较早, 采用的光源波长从 g 线 (436 nm) 到深紫外 ArF、极紫外光源, 其光源光谱范围逐渐变窄 ( $\leq 1$  pm), 使校正色差和二级光谱变得很

简单, 胶合元件已经不再需要, 需要采用大量的低折射率的熔石英和氟化钙材料透镜元件, 但对校正系统像差带来了很大好处。日本光刻机生产厂家如尼康、佳能主要采用非球面的设计, 像方视场可以做到 10.6~15.6 mm, 数值孔径为 0.54~0.85<sup>[7,8]</sup>; 德国的蔡司公司型号为 Starlith1700i、1900i 的光刻机由于采

收稿日期: 2012-09-19; 收到修改稿日期: 2012-11-13

作者简介: 吕 博(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事精密光学系统设计方面的研究。E-mail: jllvbo@163.com

导师简介: 刘伟奇(1958—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光显示技术、图像显示技术以及空间成像和瞄准技术等方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

用像方浸液技术,数值孔径可做到 1.2~1.35,其像方分辨率分别达到了 50 nm 和 45 nm。

而从解决微机械结构存在的曝光问题角度出发,在大量的微结构中如微米级印刷电路板(PCB),LED 背光源电路、数字微镜器件(DMD)处理电路等范围内,特征尺寸分辨率在微米级的光刻物镜已经足以应对,但由于在实际生产中微电子机械元件大小各异,曝光图形面积相差很大,如光刻物镜的数值孔径较小则不能曝光图形面积小的区域,而光刻物镜的数值孔径较大时则由于视场所限在曝光大面积图形时需要扫描平台的大幅度移动,其套刻精度、生产效率都会降低。采用变焦距结构的光刻物镜将不同的视场大小与数值孔径的结合,可使曝光面积大小不一特征图形更加高效。

现代半导体产品根据具体的光刻分辨精度、套刻精度及对准精度要求的不同,对所设计的光刻物镜像方数值孔径、畸变和远心度也提出了不同的数值要求。同时,为了降低加工与检测难度,采用全球面的光刻物镜也是光刻技术能够普遍商用的发展趋势。对于国内外较常见的采用 H 线作为光源的光刻物镜,其像方数值孔径主要集中在 0.25~0.4,绝对畸变在三分之一曝光特征尺寸至五分之一曝光特征尺寸,且均为有限共轭距下的定焦距光刻物镜系统。根据拉格朗日不变量<sup>[9]</sup>的定义,当同一个光刻物镜系统中具有较大像方视场时,其像方数值孔径就会有所降低;当有较高的像方数值孔径,虽满足了较高的分辨率,但此时像方视场较小。所以在同一台光刻物镜系统上在像方视场与分辨率两方面无法实现兼顾,定焦距的光刻系统只能提供固定的像方数值孔径及相应的视场,系统不具有变倍功能,这样无法在一台光刻设备上加工带有较复杂特征图形硅片(不同尺寸和分辨率等),对生产灵活性造成了一定的限制。

针对以上系统由于光学特性所限,在一种系统中不具有刻蚀多种视场、多种分辨精度的能力,本文提出一种采用全球面具有变焦距<sup>[10~12]</sup>功能的光刻物镜系统。在移动变倍组与补偿组的过程中实现有限共轭距下不同的缩小倍率与像方数值孔径的组合,在一台光刻物镜系统可曝光不同特征的刻蚀线条的功能,并完成对采用 H 线(405 nm),具有 $-0.4\times\sim-0.25\times$ 放大倍率光刻物镜的光学设计。介绍了本设计结构的系统组成及工作原理,并进行了详细的像差校正分析,并利用商用光学优化软件 Code V(美国 ORA 公司)进行进一步的像差校正控制,最

终得到了在 4 个变焦位置、全视场下较好的成像效果。满足了未来半导体工业对光刻物镜具有全球面变焦距高灵活性的设计要求。

## 2 基本设计思路

### 2.1 系统构成及工作原理

设计微米量级分辨率光刻物镜时,其对光学性能如绝对畸变、放大倍率和传递函数(MTF)<sup>[13~15]</sup>等都有一定的要求,在对光刻系统加工能力及应用范围考量后对未来变焦距光刻系统提出如下要求,要求如表 1 所示。

表 1 变焦距全球面光刻系统的设计指标  
Table 1 Specification of zoom spherical optical lithography system

| Parameters                    | Specification            |
|-------------------------------|--------------------------|
| Absolute distortion           | $\leq CD/5$              |
| Zoom ratio                    | 1.6                      |
| Wavelength /nm                | 405                      |
| Full field of object view /mm | 37                       |
| Surface type                  | Spherical surface        |
| MTF across all field and      | $\geq 0.35$ at 500 lp/mm |
| all zoom position             | $\geq 0.65$ at 250 lp/mm |

参考上述光学系统设计指标,提出一种采用负光焦度透镜作为变倍组,正光焦度透镜作为补偿组的光刻系统的设计。由于系统的变倍比较小,采用负光焦度透镜组作为变倍组,正光焦度透镜组作为补偿组时两组可同向运动,避免了在变焦过程中由于交叉运动可能造成的相碰问题,经补偿组出射的光经过由多片透镜组成的后固定组 1,产生一定的发散角度,最后经过类似显微物镜的后固定组 2 组形成像方大数值孔径并进一步校正系统像差。其系统结构示意图如图 1 所示。

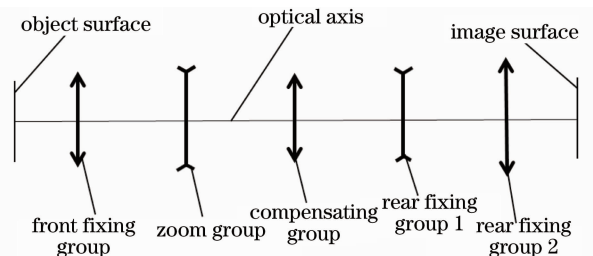


图 1 全球面变焦距双远心光刻系统结构示意图  
Fig. 1 Sketch of zoom spherical dual-telecentric optical lithographic system

按照系统元件组成功能及作用划分,本设计系统主要分为:前固定组、变倍组、补偿组、后固定组 1 及后固定组 2 共 5 个部分。其中对各部分功能说明

如下：

**前固定组：**由3片透镜组成，构成具有正光焦度的透镜组，将物方大视场的入射光会聚压低，降低各变焦位置时进入之后光学元件的光线高度，即减小系统各透镜元件的通光口径，减轻系统重量。同时，为了降低在各变焦位置处各视场主光线对系统光阑位置的敏感性，提高装调可行性，降低校正像差的难度，精简系统所用透镜数量，将系统光阑置于第一片透镜前表面，之后的设计表明光阑前置大大降低了变焦距全球面系统设计的复杂性。

**变倍组：**在小变倍比的情况下，变焦距系统一般采用正组补偿，而为了在设计中防止在变焦过程中出现的变倍组和补偿组运动相撞，同时不希望出现因变倍组和补偿组在异向运动中造成的系统总长过长，采用具有负光焦度的变倍组。通常，采用两片负透镜作为负光焦度的变倍组，本系统同样如此设计。

**补偿组：**变倍组在移动过程中实现了对系统的变焦功能，但同时在变焦过程中也造成了系统共轭距的改变，为了保持像面的不动即后工作距离的不变，使用具有正光焦度的补偿组对系统共轭距改变

量进行补偿。为了精简系统元件数量，采用最简单的2片正透镜作为补偿组。

**后固定组1：**经正光焦度出射的光需要在像面产生一定像方数值孔径，根据有限共轭距系统拉格朗日不变量的定义，进入后固定组的光也要有一定的数值孔径即有一定的发散角。为了降低系统设计难度、减轻各透镜元件所承担光焦度及消像差难度，后固定组分成后固定组1和后固定组2两部分，分别对其进行设计。其中，后固定组1主要承担产生一定的发散角，同时校正前固定组、变倍组、补偿组产生的部分像差，减轻后固定组2校正像差的压力。

**后固定组2：**后固定组2最主要的作用就是对前固定组1产生的发散角进行会聚并产生一定的像方数值孔径角，同时尽量少用透镜元件、校正前固定组、变倍组、补偿组、后固定组1的剩余像差。

## 2.2 初始结构设计及系统像差校正分析

在设计中尽量保证前固定组、后固定组1、后固定组2所用透镜元件数量少，同时满足变焦距全球面光刻系统的设计指标要求，其初始结构设计示意图如图2所示。

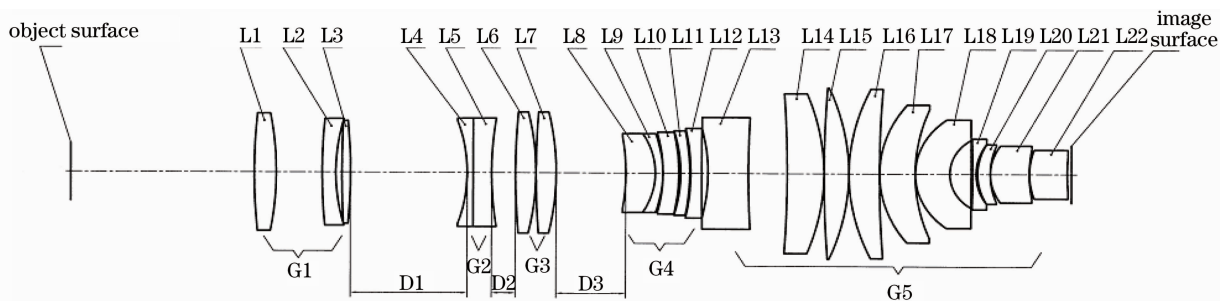


图2 变焦距全球面光刻系统初始结构示意图

Fig. 2 Initial structure layout of zoom spherical optical lithographic system

其中，前固定组、变倍组、补偿组、后固定组1和后固定组2分别用符号G1、G2、G3、G4和G5表示，相邻两组的间距分别用D1、D2和D3表示。

在光学设计中关注的是光学元件各个折射面产生的像差的对应关系，主要是符号及绝对值大小的对应关系，为方便说明结构各部分与各个折射面参数的直接关系，用初级像差系数和公式来代表这些参数。其初级像差系数<sup>[16]</sup>及相关公式如下所示：

$$\text{球差: } S_1 = -2n'_k u'_k{}^2 \delta L'_k, \quad (1)$$

$$\text{彗差: } S_2 = -2n'_k u'_k K'_{sk}, \quad (2)$$

$$\text{像散: } S_3 = -n'_k u'_k{}^2 x'_{tsk}, \quad (3)$$

$$\text{场曲: } S_4 = -2n'_k u'_k{}^2 x'_{pk}, \quad (4)$$

$$\text{畸变: } S_5 = -2n'_k u'_k y'_{zk}, \quad (5)$$

由(1)~(5)式得初级像差系数并对系统进行像

差分析。

本设计中，前固定组采用库克式3片透镜结构，其6个半径和2个空气间隔共8个变量参数可用来消除像差，从数学理论上讲是能够消除包括色差在内的全部7种像差的最简单结构。其“两正一负”的透镜组成有利于校正球差，同时中间透镜为负透镜使其具有校正场曲的可能。此外，第二片负透镜选用色散系数较大的玻璃材料，有利于平场条件下的光焦度的分布；前固定组中各透镜元件承担的光焦度较均衡，有利于4种轴向像差的校正。

在前固定组选型完毕后，变倍组在实现系统变焦过程中，兼顾补偿前固定组所产生的负球差及负畸变。由初级像差系数公式可知，变倍组的两片式负透镜可产生正球差和正畸变系数用于补偿前固定

组,但会在校正过程中引入较大的正场曲而使像面发生弯曲。

补偿组采用常见的两片式正透镜结构,从应用光学角度方面补偿由于变倍组在移动过程中造成系统共轭距离变化导致的像面移动问题,从像差校正方面补偿 G1、G2 共同产生的正佩茨瓦尔场曲和正彗差。但此时两片正透镜产生了一定负子午及弧矢像散。

正组补偿之后光线有会聚的趋势,而在 2.1 节已讨论过,经过后固定组 1 的光线要有一定的发散角。考虑到系统的总长尽量短、光刻物镜敏感的成像质量及减小后固定组 2 校正像差的压力 3 个因素,后固定组 1 采用类双高斯镜头形式的结构,对进入后固定组 1 的光线产生一定的发散角度。后固定组 1 中元件空气间隔尽量短,光线在各折射表面入射角尽量小。由于后固定组 1 具有负光焦度,出射光线具有一定的发散角度,系统产生了较大的正球差,同时不可避免地引入了负彗差、正子午、弧矢像散、较大的正佩茨瓦尔场曲及正畸变。

由于系统像方数值孔径不是很大,后固定组采用显微镜物镜常用的李斯特结构。但考虑到李斯特结构中含有的双胶合元件,特将胶合元件拆开,同时增加透镜元件数量,进而增大系统设计自由度,校正后固定组 1 引入的像差。后固定组 2 中采用若干个

厚弯月负透镜校正场曲,两片光焦度较大的正透镜校正了正球差,同时子午及弧矢方向的像散均校正到很小,从而整个系统的场曲系数也非常小。

### 2.3 变焦位置成像质量优化控制

根据系统所在的 4 个变焦位置,分别对其进行进行系统总长、放大倍率和像方远心度的控制并优化,然后在各变焦位置的 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9 和 1.0 视场,分别对离轴像差量控制并优化。复检各变焦位置的绝对畸变及远心度,在计算绝对畸变时保证小于五分之一的特征尺寸(放大倍率的偏差主要由绝对畸变造成,因此要严格控制各变焦位置全视场下的绝对畸变)。远心度决定套刻精度,对远心度的优化采用控制各视场主光线入射到像面角度,需逐一视场进行控制并优化。

## 3 优化设计结果分析

根据系统设计要求及上述对系统的优化操作,利用光学设计软件自带及编写的宏,对全球面变焦距光刻系统结构进行了设计并优化,其设计结果示意图如图 3 所示。图中自上而下分别给出了系统放大倍率为  $-0.4\times$ 、 $-0.35\times$ 、 $-0.3\times$  和  $-0.25\times$  时的外形结构。

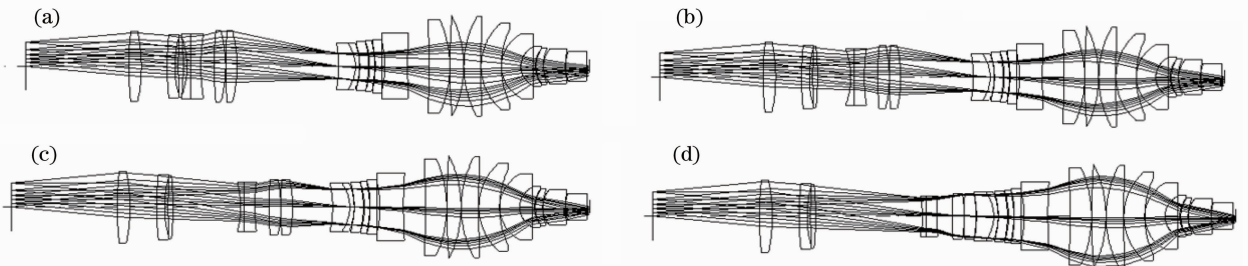


图 3 系统设计结果示意图。(a)  $-0.4\times$ ; (b)  $-0.35\times$ ; (c)  $-0.3\times$ ; (d)  $-0.25\times$

Fig. 3 Layout of system design result. (a)  $-0.4\times$ ; (b)  $-0.35\times$ ; (c)  $-0.3\times$ ; (d)  $-0.25\times$

在 250 lp/mm 和 500 lp/mm 下,4 个变焦位置系统及全视场的传递函数如图 4 和图 5 所示。

从图 4 及图 5 可以看出,在 250 lp/mm 下,4 个变焦位置及全视场范围内子午及弧矢方向的系统传递函数均接近或大于 0.7;在 500 lp/mm 下,4 个变焦位置及全视场范围内子午及弧矢方向的系统传递函数均大于 0.4,系统满足设计要求。系统其他参数也同样满足设计要求,各视场照度均匀。同时,系统没有使用特种玻璃,系统最大通光孔径元件为第 15 片透镜,光学系统重量为 1.28 kg,总长为 805 mm(物面

到像面),较好地降低了生产成本及空间体积。

## 4 结 论

设计出具有全球面变焦距光刻系统,共由 22 片透镜组成,没有使用特种玻璃,降低了制造成本;加入的变焦距功能使在一台光刻系统刻蚀多特征尺寸成为可能;系统总长为 805 mm,结构紧凑,最大通光元件直径小于 152 mm,进一步减小了空间体积;采用变焦距系统中常见的两片负透镜作为变倍组,两片正透镜作为补偿组的结构最大程度上减少了透

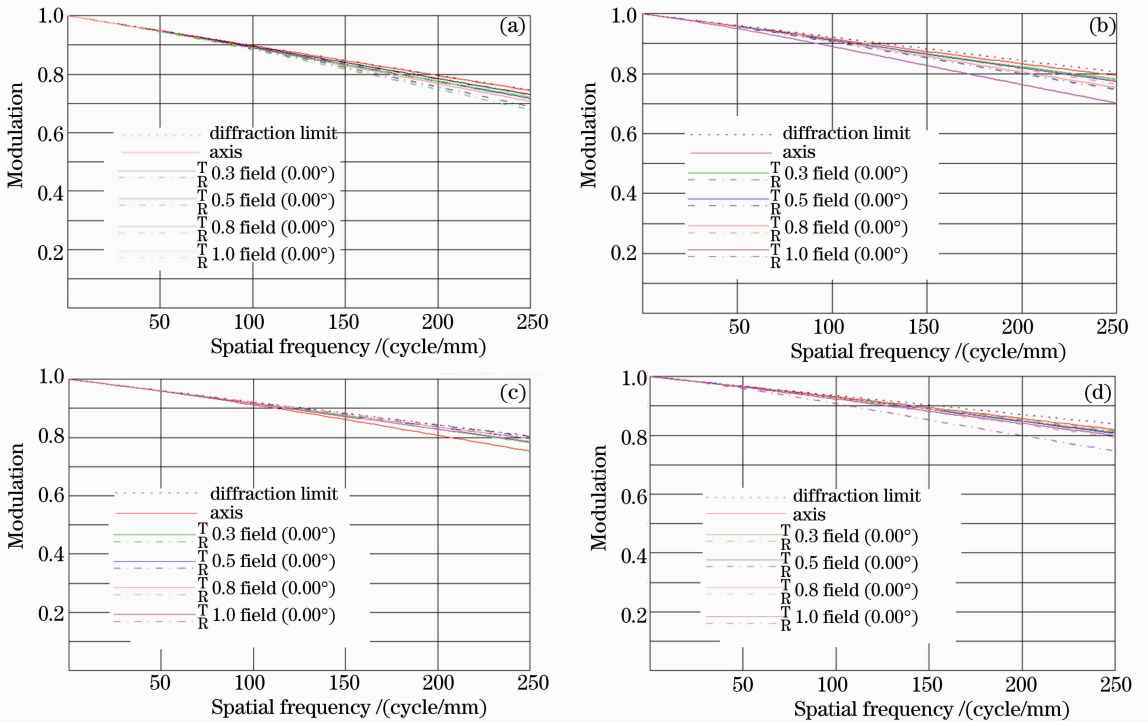


图 4 各变焦位置全视场下 250 lp/mm 传递函数。(a)  $-0.40\times$ ；(b)  $-0.35\times$ ；  
(c)  $-0.30\times$ ；(d)  $-0.25\times$

Fig. 4 MTF of lens with 500 lp/mm at different zoom positions and all fields of view. (a)  $-0.40\times$ ；(b)  $-0.35\times$ ；  
(c)  $-0.30\times$ ；(d)  $-0.25\times$

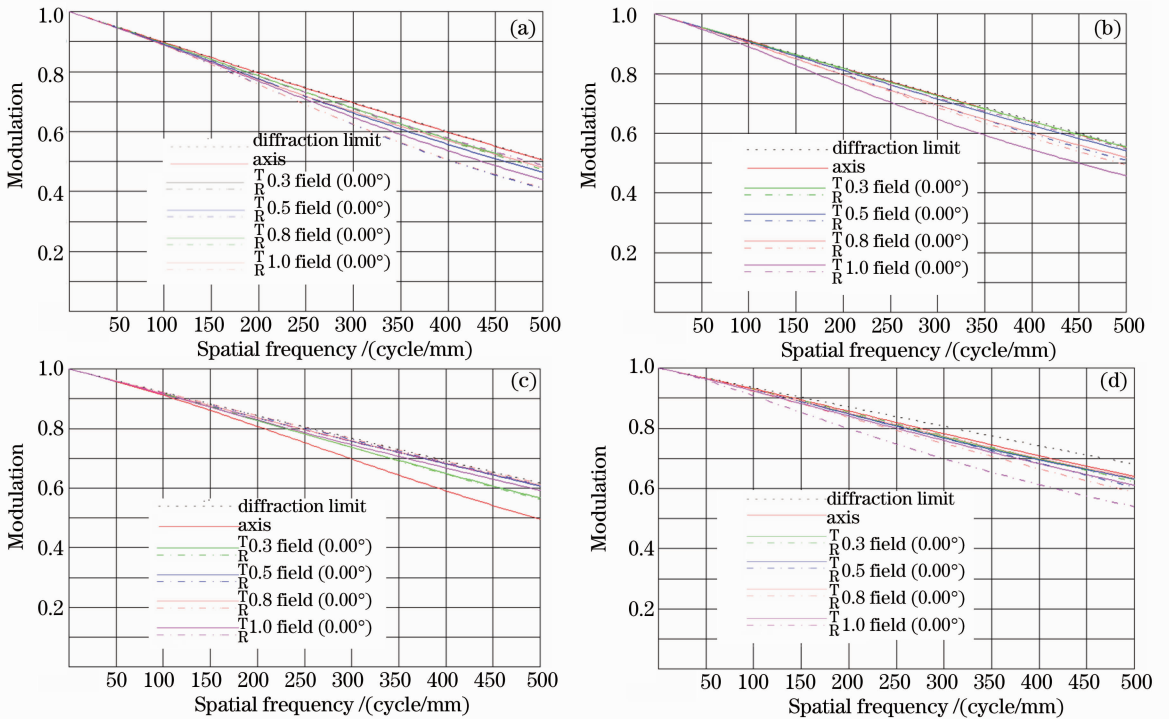


图 5 各变焦位置全视场下 500 lp/mm 传递函数。(a)  $-0.40\times$ ；(b)  $-0.35\times$ ；  
(c)  $-0.30\times$ ；(d)  $-0.25\times$

Fig. 5 MTF of lens with 500 lp/mm at different zoom positions and all fields of view. (a)  $-0.40\times$ ；(b)  $-0.35\times$ ；  
(c)  $-0.30\times$ ；(d)  $-0.25\times$

镜元件的使用。设计结果表明该系统在 4 个变焦位置,全视场在 250 lp/mm 传递函数均接近或大于 0.7,在 500 lp/mm 传递函数均大于 0.4,成像质量好,同时可以在此结构的基础上构建变倍比更大,视场更大的具有变焦功能的全球面光刻系统。

## 参 考 文 献

- 1 B. H. John. Optical lithography: 40 years and holding [C]. *SPIE*, 2007, **6520**: 652004
- 2 Liu Fei, Li Yangqi. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 222003  
刘 菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 222003
- 3 M. Tomoyuki, O. Yasuhiro, M. W. David. The lithographic lens: its history and evolution [C]. *SPIE*, 2006, **6154**: 615403
- 4 Udo Dinger. Microlithography Project Objective and Projection Exposure Apparatus [P]. U. S. Patent U S20060198029. 2006-9
- 5 Ma Bin, Li Lin, Chang Jun *et al.*. Refractive projection lens for 90 nm resolution lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s2): 211~215  
马 斌, 李 林, 常 军等. 高分辨率折射式投影光刻物镜的研究[J]. 光学学报, 2009, **29**(s2): 211~215
- 6 Chen Mingyong. Design of Objective for Digital Gray-Tone Lithography [D]. Sichuan: Sichuan University, 2007. 3~5  
陈铭勇. 数字灰度光刻成像物镜设计[D]. 四川: 四川大学, 2007. 3~5
- 7 Kafai Lai, Alan E. Rosenbluth, Geng Han *et al.*. Modeling polarization for hyper-NA lithography tools and masks [C]. *SPIE*, 2007, **6520D**
- 8 Xu Weicai. Optical Design and Imaging Performance Compensation for the Lithographic Lens [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, China Academy of Sciences, 2011. 5  
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计及像质补偿[D]. 长春: 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2011. 5
- 9 Chi Zeying, Chen Wenjian. Applied Optics and Elements of Optical Design [M]. Nanjin: Southeast University Press, 2008. 54~55  
迟泽英, 陈文建. 应用光学于光学设计基础[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008. 54~55
- 10 Huang Lin. Research on Two kinds of Zoom Optical System Design [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2002. 15~33  
黄 玲. 两种变焦距光学系统的设计研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2002. 15~33
- 11 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 636~655  
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 636~655
- 12 Liang Laishun. A rapid computing method zoom optical design [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **25**(1): 17~20  
梁来顺. 变焦距系统设计的快速求解[J]. 应用光学, 2004, **25**(1): 17~20
- 13 J. M. Geary. Introduction to Lens Design [M]. U. S.: Willmann-Bell, Inc
- 14 Wang Zhijiang. Applied Optics Technical Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 518~550  
王之江. 实用光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 518~550
- 15 Wang Zhijiang. Theory Elements of Optical Design [M]. Beijing: Science Press, 1985. 321~345  
王之江. 光学设计理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 321~345
- 16 Yuan Xucang. Optical Design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988. 80~81  
袁旭沧. 光学设计 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. 80~81

栏目编辑: 韩 峰