

光刻投影物镜恒温水套小比例模型的设计与性能测试

彭海峰¹ 于新峰¹ 秦硕²

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室超精密光学工程中心, 吉林 长春 130033

²空军航空大学航空理论系, 吉林 长春 130022

摘要 恒温水套是光刻物镜工作环境温度控制系统的重要组成部分。为了研究恒温水套的关键参数与性能, 设计了一个小比例水套模型。恒温温控系统对其提供 $\pm 0.001\text{ }^\circ\text{C}$ 的去离子水, 通过对比三镜光机系统温度变化及热像差变化获取小比例水套的关键参数。实验数据表明, 在加入热扰动且环境温度为 $22.06\sim 22.16\text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下, 三镜光机系统的内壁温度被控制在 $(22\pm 0.01)\text{ }^\circ\text{C}$ 以内, 波像差在热扰动后迅速恢复至 10.12 nm , 与装调完毕状态基本一致。由此可见, 此种水套结构可以满足光刻投影物镜的温度控制要求, 可在此基础上设计等比例恒温水套模型。

关键词 测量; 投影物镜; 恒温水套; 热像差; 温度测试

中图分类号 TP394.1; TH691.9 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.081201

Design and Performance Testing of Constant-Temperature Water Jacket Small-Scale Model of Lithographic Projection Lens

Peng Haifeng¹ Yu Xinfeng¹ Qin Shuo²

¹*Precision Optic Engineering Center, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China*

²*Department of Aviation Theory, Aviation University of Air Force, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract Constant-temperature water jacket is an important part of the lithographic lens working environment controlling system. A small-scale water jacket model is designed to research the key parameters and properties of constant-temperature water jacket. The constant-temperature water controlling system provides deionized water within $\pm 0.001\text{ }^\circ\text{C}$ to it, and the key parameters of small-scale water jacket is obtained by comparing the variation of three-mirror optical-mechanical system temperature and thermal aberration. The experimental data shows that when the thermal disturbance is introduced and the temperature of the environment is $22.06\sim 22.16\text{ }^\circ\text{C}$, the temperature of the inside barrel of the three-mirror optical-mechanical system can be controlled within $(22\pm 0.01)\text{ }^\circ\text{C}$. The wave aberration is restored to 10.12 nm after thermal aberration, which is almost equal to the status of the assembled and adjusted system. It shows that the structure of the water jacket can satisfy the demand of the temperature controlling for the projection lens. The equal proportion constant-temperature water jacket can be designed based on it.

Key words measurement; projection lens; constant-temperature water jacket; thermal aberration; temperature testing

OCIS codes 120.4640; 120.4880; 220.3740; 080.1010; 080.3630

1 引言

近年来, 超大规模集成电路生产线在我国国民生产中发挥着愈发重要的作用。光刻投影物镜作为集成电路生产线的核心部件, 对工作环境的要求极高, 温度、气压、洁净度、噪声、振动等参数都需要控制在一个极小的波动范围内^[1-4]。其中, 温度控制是光刻系统工作环境控制的难点之一^[5-8]。环境温度的微小波动和自身的受激光照射后发热引起的工况温度变化都会引起物镜的焦点位置偏移及成像畸变, 进而造成成像质量

收稿日期: 2016-02-01; 收到修改稿日期: 2016-03-14; 网络出版日期: 2016-07-20

基金项目: 国家重大专项基金(2009ZX02205)

作者简介: 彭海峰(1986—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事精密光机系统方面的研究。E-mail: kedapeng1986@163.com

的变化,降低分辨率^[9-11]。一般来说,其所处微环境温度稳态误差不能超过 ± 0.01 K,以降低外部环境对成像质量的影响^[12-15]。因此,除需要对光刻物镜工作环境的温度提高要求外,还需在光刻物镜外侧设置一个恒温水套^[16-18],用隔绝光刻物镜与外部环境的方法来使物镜工作在一个相对恒温的环境中,通过恒温去离子水的流动来保证光刻物镜的热环境^[16,19]。

光刻投影物镜是一种温控惯性很大的光机系统,这决定了其恒温水循环温控系统的复杂性^[6]。在投影光刻物镜系统的恒温水套工作过程中,水的流动状态、流体传热、流体和固体之间的换热和固体热传导问题都会对其温控性能有重要的影响。由于恒温水套的结构较为复杂,单纯通过理论和仿真很难获得准确的设计参数,因此,除必要的理论计算和仿真外,须通过相应的实验来获取其关键参数。

对关键部件的前期研发,如直接进行等比例模型验证成本较高,实验模型较为复杂,为节省研发成本,降低风险,可通过对小比例模型进行验证性实验的方式来获取重要的工作参数^[14],以指导实际尺寸部件的设计、加工和实验。本文根据恒温水套的结构特点,设计了一种小比例恒温水套模型,并利用控制精度达到 ± 0.001 °C的恒温水和与小比例模型匹配的三镜光机系统,进行了温度控制性能及像质补偿效果实验。

2 结构设计

图1为恒温水套小比例模型设计图。主要包括中心筒、水管、进水口、出水口、调心孔、传感器孔及底座等。水管呈双螺旋状绕中心筒上行后下行与出水口相连;调心孔处布置三处调心螺钉,中心筒上预留传感器孔用于温度采样传感器数据线的接入。恒温水套的设计要考虑隔绝物镜附近热环境及外部环境,同时自身具有良好的导热性,以提升温控效率。因此水套外部涂敷厚度0.2 mm、热导率为 0.08 W/(m·K)的绝热漆,中心筒、水管材料分别采用导热良好的铝合金及紫铜。结合实际物镜的水套尺寸,选用外径为8 mm、内径为6 mm的紫铜管,中心筒厚度为3 mm。

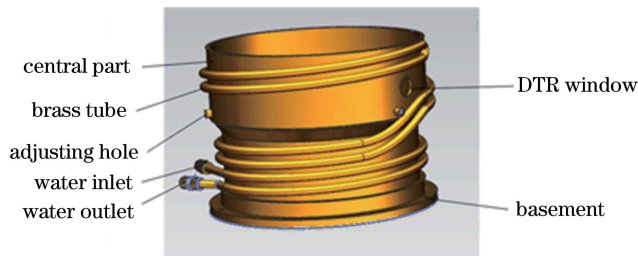


图1 光刻物镜小比例水套模型结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the small-scale water jacket for lithography lens

与恒温水套小比例模型相匹配的光机系统为三镜光机系统,如图2所示,主要部件包括上镜筒、下镜筒、镜框、隔圈、调心螺钉以及由三片光学元件组成的光学系统;三镜光机系统的光学系统理论设计波像差的均方根(RMS)为30 nm,装调后,半口径波像差的RMS为10.21 nm,基本达到了光学设计预计的水平。

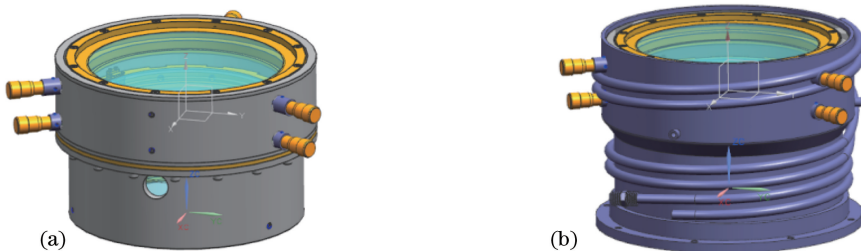


图2 三镜光机系统结构示意图。(a) 三镜光机系统; (b) 三镜光机系统及水套装配体

Fig. 2 Structure of the three-mirror optical-mechanical system. (a) Three-mirror optical-mechanical system; (b) three-mirror optical-mechanical system and assembly of water jacket

3 实验结果

3.1 实验系统介绍

小比例恒温水套与底座、支架、托架组成的工装及三镜光机系统共同组成小比例恒温水套实验组件(见图3)。

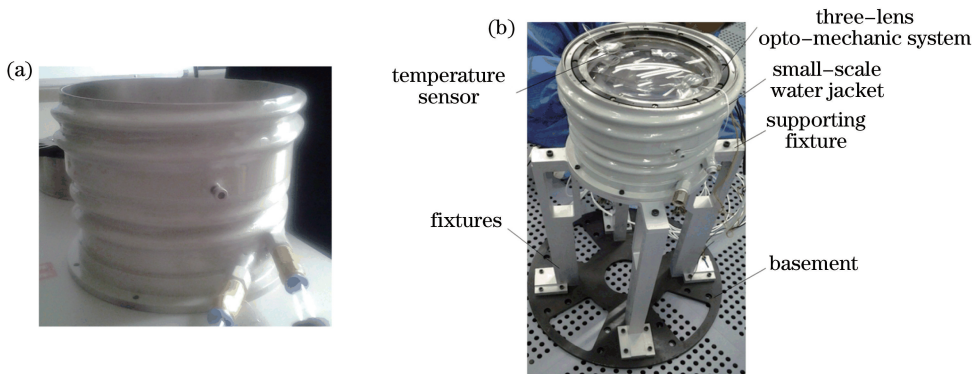


图3 小比例恒温水套实验组件。(a) 小比例恒温水套；(b) 小比例恒温水套与工装

Fig. 3 Components of the small-scale constant-temperature water jacket for test.

(a) Small-scale constant-temperature water jacket; (b) small-scale constant-temperature water jacket and the fixtures

如图4所示,温控系统验证实验组件包括小比例水套模型、Zygo干涉仪、高精度温控系统,水套模型固定于工装上并放置于干涉仪检测台上,工装底座上放置球面参考镜及其三维调节工装。

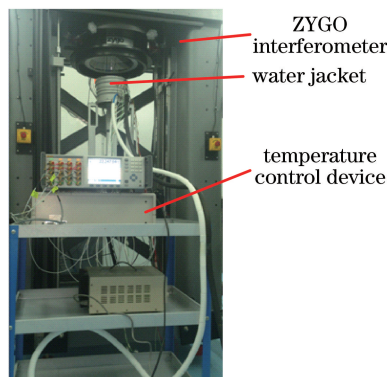


图4 温控实验系统

Fig. 4 System of temperature controlling test

实验采用的模拟物镜温控系统采用迭代最小二乘算法,辨识得到物镜的自动回归滑动平均温度响应模型,以模拟物镜内部温度的稳定为目标进行温度控制,通过两级热惯性实验确定模拟物镜的主要温控参数,控制电磁阀的流量输出以使水套的温度处在理想范围。

在温控系统性能实验时,以电加热片为热源,加热片电阻约为 $R = 32 \Omega$,通过改变电压来改变加热功率。加热片分别对称布置在镜片的通光口径以外。加热和测温区域不对通光口径形成遮挡。

温度采样点如图5所示。每个镜片设置三个测温点,三个测温点在同一径向上的不同周向位置上。温度采样系统共包括13个通道,通道S5~S13采集各镜片测温点的温度,S14采集镜筒内壁的温度,可作为三镜光机系统工作环境温度的重要参考指标。

3.2 系统波像差检测实验

分别设置恒压源输入电压为1、2、3 V,其中当热扰动电压为2 V时,热扰动的功率大于光刻投影物镜的吸收功率,比实际物镜吸收光功率大2~3倍。对三镜系统的波像差进行检测,将检测前后的系统波像差相减,得到三种情况下的热像差分别为19.177、78.011、174.789 nm(见图6),随着热载荷的增大,系统热像差明显增大。

3.3 系统波像差的补偿效果

加热电压为2 V时,模拟物镜的系统波像差检测结果如图7所示,其中波像差上升阶段对应开始加热,波像差下降对应停止加热。

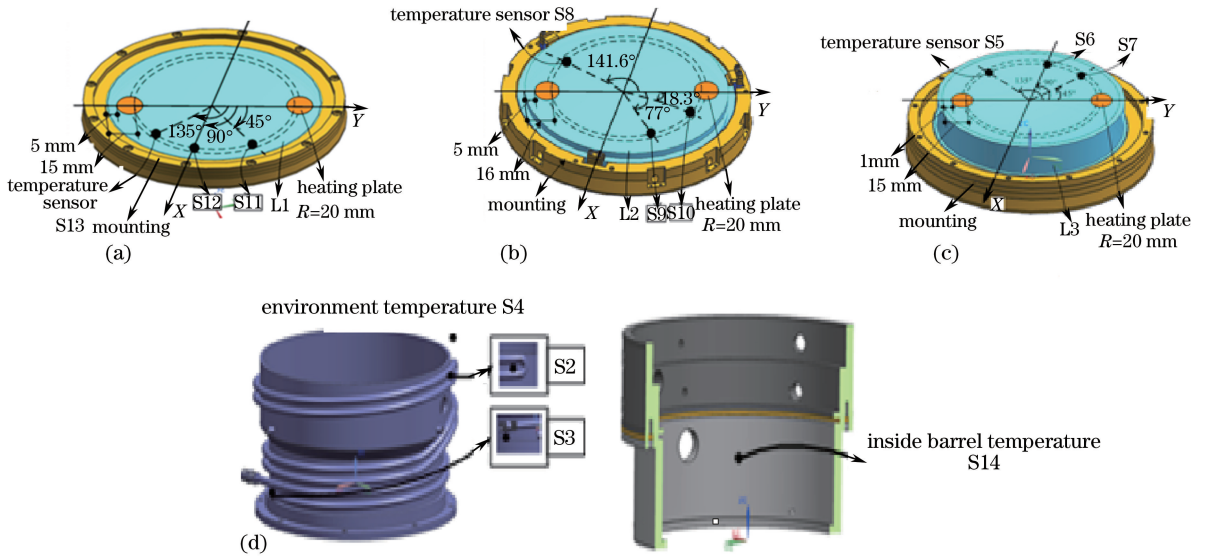


图 5 温度传感器布局。(a) 镜组 1 加热片及传感器；(b) 镜组 2 加热片及传感器；
(c) 镜组 3 加热片及传感器；(d) 水套及镜筒温度传感器

Fig. 5 Locations of the temperature sensors. (a) Heating sheets and sensors of lens group 1; (b) heating sheets and sensors of lens group 2; (c) heating sheets and sensors of lens group 3; (d) temperature sensors of water jacket and barrel

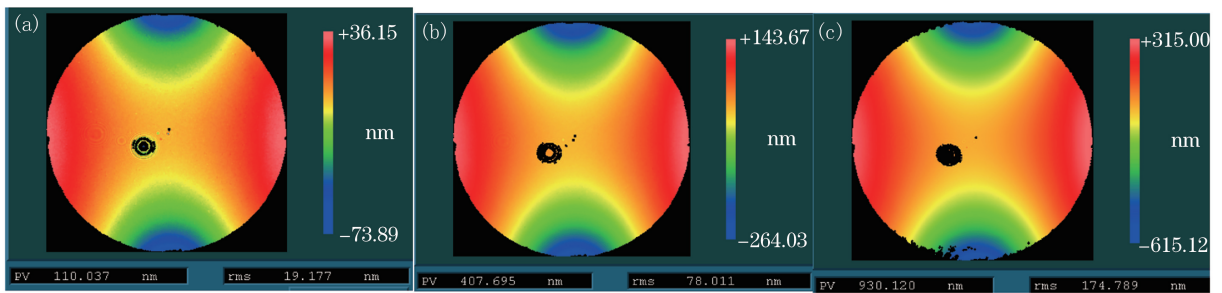


图 6 不同加热电压下的热像差。(a) 1 V；(b) 2 V；(c) 3 V

Fig. 6 Thermal aberrations under different heating voltages. (a) 1 V; (b) 2 V; (c) 3 V

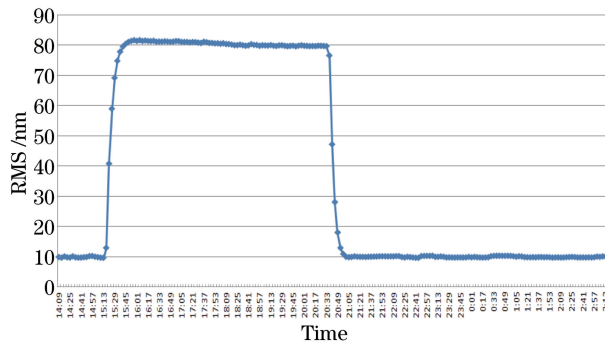


图 7 加热电压为 2 V 时系统波像差变化趋势

Fig. 7 Variation tendency of the system wave aberration with the heating voltage of 2 V

从图中可以看出,在恒温水套的控制下,模拟物镜的系统半口径波像差从约 80 nm 迅速下降至约 10.12 nm,基本与装调后上午最优波像差一致。说明在加入对模拟物镜的热惯性来说相对较大的热扰动功率的情况下,恒温水套及恒温水系统仍使得模拟物镜系统波像差得到了较为迅速的恢复。

3.4 温控效果实验

加热电压为 2 V 时,在对模拟物镜进行波像差监测的同时,还通过采集对应测量通道的温度传感器数据,分别获取环境温度,水套壁面上端、水套壁面下端及镜筒内壁温度。水套壁面上端及下端的温度数据变

化趋势如图 8 所示,由测试结果可以看出,水套上部的温度在冷却循环水的作用下,最终稳定在 $(22 \pm 0.01)^\circ\text{C}$ 范围内,而水套下端的温度范围最终被稳定在 $(21.94 \pm 0.01)^\circ\text{C}$ 。

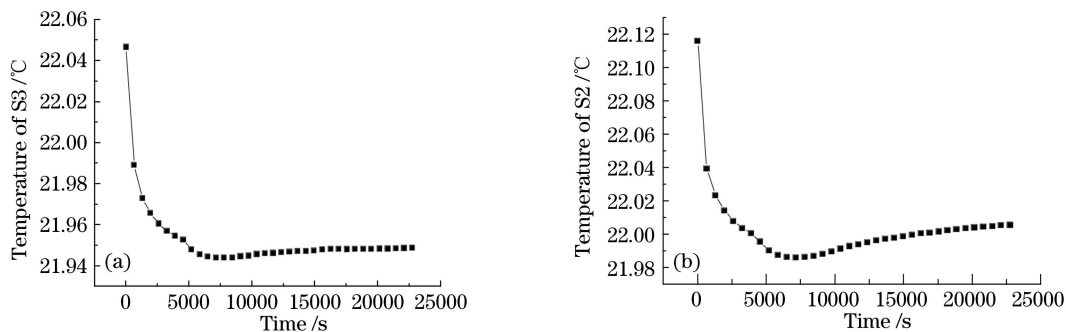


图 8 水套不同部位温度变化趋势。(a) 水套壁面上端;(b) 水套壁面下端

Fig. 8 Temperature variation tendency of different parts of the water jacket. (a) Up-water jacket; (b) down-water jacket

环境温度变化曲线如图 9(a)所示,环境温度的变化范围在 $22.06 \sim 22.16^\circ\text{C}$ 之间,且呈现逐步增高的趋势。同时由通道 14 获取镜筒内壁的温度变化曲线如图 9(b)所示,由镜筒内壁温度变化趋势可见,镜筒内壁的温度被稳定在 $(22.006 \pm 0.005)^\circ\text{C}$ 范围内。说明模拟物镜的微环境温度被控制到合理范围内。

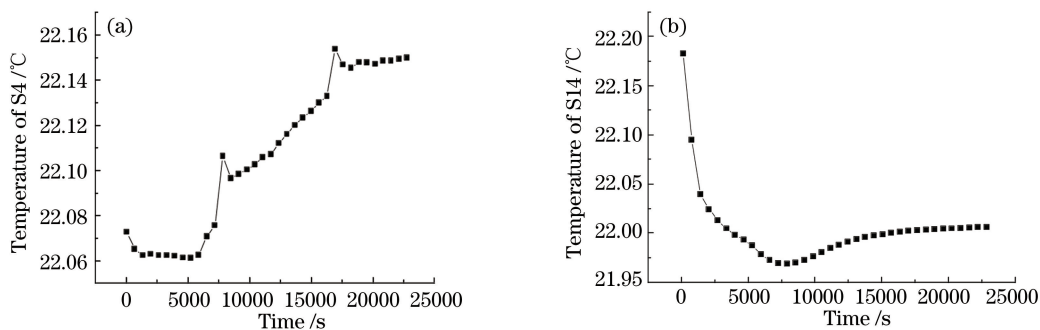


图 9 恒温水套对模拟物镜内环境温度的补偿。(a) 环境温度变化曲线;(b) 镜筒内壁温度变化曲线

Fig. 9 Compensation of the constant-temperature water jacket to the inner environment of simulative lens.

(a) Tendency of the environment temperature; (b) tendency of the temperature of the inside barrel

5 结 论

根据光刻物镜恒温水套的结构设计要求,结合现有的三镜光机系统模型,设计了一个小比例恒温水套模型。结合相应的工装与支架、温控系统和干涉仪等设备,进行了温控系统实验及光学系统检测实验。实验结果表明:在热扰动为电压 2 V 时,且环境温度变化范围为 $22.06 \sim 22.16^\circ\text{C}$ 范围内情况下,提供控制精度为 $\pm 0.001^\circ\text{C}$ 的去离子水,可将单镜模型的镜筒内壁温度被稳定控制在 $(22 \pm 0.01)^\circ\text{C}$,达到了光刻投影物镜的工作要求。同时,在停止加热的情况下,系统波像差从约 80 nm 下降至约 10.12 nm ,基本与加热前一致。说明在热扰动较大情况下,恒温水套及恒温水系统使得模拟物镜系统波像差得到了迅速恢复。可基于此结构进行等比例光刻投影物镜恒温水套的结构设计。

参 考 文 献

- 1 Mann K, Bayer A, Leinhos U, *et al.* Measurement of wavefront distortions in DUV optics due to lens heating[C]. SPIE, 2011, 7973: 79732B.
- 2 Mulkens J, Flagello D, Streefkerk B, *et al.* Benefits and limitations of immersion lithography [J]. Journal of Microlithography, Microfabrication and Microsystems, 2004, 3(1): 104-114.
- 3 Burnett H, Shedd T, Nellis G, *et al.* Control of the receding meniscus in immersion lithography[J]. Journal of Vacuum Science and Technology B, 2005, 23(6): 2611-2616.

- 4 Chen Weiming, He Chao, Liu Yeyi. An algorithm for controlling objective lens temperature[C]. SPIE, 1999, 3677: 377-381.
- 5 Qin Shuo, Gong Yan, Yuan Wenquan, *et al.* High precision temperature control for projection lens with long time thermal response constant[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 108-114.
秦 硕, 巩 岩, 袁文全, 等. 大时间热响应常数投影物镜的超高精度温度控制[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(1): 108-114.
- 6 Han Xu, Ma Jun, Li Ming, *et al.* Temperature adaption of mapping camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1175-1181.
韩 旭, 马 军, 黎 明, 等. 测绘相机的温度适应性[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(6): 1175-1181.
- 7 Wu Xiaoxia, Wang Minghao, Ming Ming, *et al.* Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1243-1249.
吴小霞, 王鸣浩, 铭 明, 等. 大口径 SiC 轻量化主镜热变形的定标[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(6): 1243-1249.
- 8 Yang Xianwei, Wu Qingwen, Li Shusheng, *et al.* Thermal design of space optical remote sensor[J]. Chinese Optics, 2011, 4(2): 139-146.
杨献伟, 吴清文, 李书胜, 等. 空间光学遥感器热设计[J]. 中国光学, 2011, 4(2): 139-146.
- 9 Gong Dun, Wang Hong, Wang Tiejun. Temperature effect on imaging performance of three-line CCD satellite camera and temperature indicators affirmed[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2017-2021.
巩 盾, 王 红, 王铁印. 温度对星载相机的影响和温控指标的制定[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2017-2021.
- 10 Zeng Yi. Thermal structure design of the lithography's precision temperature control system of water[D]. Chengdu: University of Electronic and Technology of China, 2012.
曾 毅. 光刻机精密水温控制系统的热结构设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- 11 Wang Hongguang. The design and implement of lithography's temperature control unit [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
王红光. 光刻机温度控制装置的设计与实现[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- 12 Zhou Zinan, Ma Jun, Yu Pei, *et al.* Laser/infrared optical system design of common optical path and athermalization[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 012202.
周子楠, 马 军, 尉 佩, 等. 激光/红外共光路无热化光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 012202.
- 13 Cao Zhen, Li Yanqiu, Sun Yuanyuan. Compensator selection and accuracy analysis for extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 1211003.
曹 振, 李艳秋, 孙圆圆. 极紫外光刻物镜补偿器的选择及定位精度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 1211003.
- 14 Nie Shanjun, Guo Jin, Shao Junfeng, *et al.* Numerical analysis on the thermal-deformation of semiconductor refrigerated mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0114002.
聂山钧, 郭 劲, 邵俊峰, 等. 半导体制冷对镜面热变形影响的数值研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0114002.
- 15 Lan Gongpu, Wang Xuan, Liang Wei, *et al.* Optical design and thermal analysis for the active-focusing aerial camera objective[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322006.
蓝公仆, 汪 旋, 梁 伟, 等. 主动调焦式航空相机物镜光学设计及温度仿真分析[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322006.
- 16 Nie Hongfei, Li Xiaoping, Zhang Lingli. Temperature control algorithm for optical lithography projection lens [J]. Chinese Mechanical Engineering, 2008, 19(10): 1135-1139.
聂宏飞, 李小平, 张玲莉. 光刻机投影物镜的温度控制算法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1135-1139.
- 17 Nie Hongfei, Li Xiaoping. Modeling for lithography temperature control system based on gray identification[J]. Chinese J Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 98-101.
聂宏飞, 李小平. 基于灰色辨识的光刻机恒温控制系统建模[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 98-101.
- 18 Yao Hanmin, Hu Song, Xing Yanwen. The technology of lithographic projection and micro-nano processing[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006.
姚汉民, 胡 松, 邢延文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006.
- 19 Yuan Wenquan, Gong Yan, Zhang Wei, *et al.* Downscaling model test design for constant-temperature water jacket of lithography lens[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(1): 60-65.
袁文全, 巩 岩, 张 巍, 等. 光刻物镜恒温水套的小比例模型实验设计[J]. 光电工程, 2011, 38(1): 60-65.