

# 利用面形精修技术去除投影物镜中的三叶像差

赵 阳 王 平 史振广 谷勇强 刘春来 门树东

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, 吉林 长春 130033

**摘要** 极小像差投影物镜中的高阶像差很难通过调节机构消除,是约束像质进一步补偿优化的瓶颈。离子束溅射(IBF)设备广泛应用于光学加工中,能够较好地去除低频和中频误差,实现高精度面形精修。对现有投影物镜小比例验证模型的系统波像差成分进行条纹泽尼克分析,发现存在很大的三叶像差。利用面形精修技术对物镜中的一个表面进行定量精修去除以补偿三叶像差。仿真与实验结果表明,三叶像差得到很好的控制,系统波像差由原来的29.6nm(RMS)减小到12.7 nm(RMS),成像质量得到进一步提升,验证了这种三叶像差补偿方法的正确性和可行性。

**关键词** 几何光学; 三叶像差; 面形精修; 条纹泽尼克多项式

中图分类号 O435.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0822004

## Remove Trefoil Aberration of Project Objective Using Lens

### Surface Re-Polishing Technology

Zhao Yang Wang Ping Shi Zhenguang Gu Yongqiang Liu Chunlai Men Shudong

State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** It is impossible to remove the high order aberrations of minimum aberration project objective only with adjustable structures, which is a bottleneck to restrain further optimization. Ion beam figuring (IBF) instrument is widely used in optical lens manufacturing. IBF can well control low and middle frequency figuring errors to obtain high accuracy figuring polish. The wavefront error of projection lens small scale model is analyzed using fringe Zernike polynomials, which contains a large amount trefoil aberration. One surfaces of the objective is chosen to remove designated figures using IBF to compensate trefoil aberration of the whole system. Simulation and experiment results show that trefoil aberration is well controlled, and the wavefront error is reduced from 29.6 nm (RMS) to 12.7 nm (RMS). The quality of objective is greatly improved, which proves the correctness and applicability of this trefoil aberration compensating method.

**Key words** geometrical optics; trefoil aberration; lens surface re-polishing; fringe Zernike polynomials

**OCIS cods** 220.1000; 220.5450; 220.3740; 220.4610

## 1 引 言

近年来,极大规模集成电路制造设备在按照摩尔定律不断地推陈出新,作为该设备核心部件的光刻投影物镜,其系统波像差均方根值(RMS)要求仅几个纳米,成像质量早已超过传统意义上的45 nm (RMS)的衍射极限<sup>[1-3]</sup>。对于90 nm曝光线宽的光刻物镜而言,普遍采用36项条纹泽尼克系数表达,其中的 $Z_1\sim Z_4$ 项不体现真实波像差值, $Z_5\sim Z_9$ 项属于低阶像差,分别对应 $0^\circ/90^\circ$ 和 $45^\circ/135^\circ$ 三阶象散、X和Y向三阶彗差,以及三阶球差。这五项像差在波像差中占据绝大多数,在透射式光学系统中,可以通过物镜的偏心(或倾斜)和轴向调整机构进行补偿,国内外文献也多为对这些初级像差的补偿方法的讨论<sup>[4-5]</sup>。但对于 $Z_{10}$ 以上的

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-03-13

基金项目: 国家重大科技专项02专项(2009ZX02005)

作者简介: 赵 阳(1982-),男,博士,副研究员,主要从事光学系统设计和计算机辅助装调方面的研究。

E-mail: juventus-xx@126.com

泽尼克系数,对应高阶像差,上述传统的调节机构的补偿能力非常有限。而这些高阶像差正是制约极小像差光学系统像质进一步优化的瓶颈,必须予以消除。在Nikon公司的光刻物镜系统中,普遍采用三点支撑的六自由度约束结构<sup>[6-8]</sup>。这种结构的机械加工误差会引入 $Z_{10}$ 、 $Z_{11}$ (即三叶像差),此外,镜片材料的透过率均匀性也会引入三叶像差。经过多轮的可调机构补偿,确实无法消除该像差<sup>[9]</sup>。

利用离子束溅射的原理对光学表面进行定性修形对镜片表面的中、低频误差进行有效去除,而又不破坏高频误差,可以将镜片表面面形优化至1 nm(RMS)以下<sup>[10-13]</sup>。

考虑到三叶像差属于低频误差,针对离子束镜面修形的特点,有可能利用面形精修技术予以去除。本文根据投影物镜小比例模型物镜的波像差的实测结果,对物镜中的一个表面作为面形精修的对象,仅经过一轮精修,三叶像差明显减小,像质重复测试结果表明,系统波像差由原来的29.6 nm(RMS),减小到12.7 nm(RMS),得到了较高的成像质量,验证了所提出方法的可行性和有效性。

## 2 投影物镜小比例模型光学系统

光刻投影物镜中,对光学镜片、机械结构零件的加工、检测和装调的要求都很高。多数元件的装配误差都在微米量级,个别元件甚至小于1 μm。研究对象为投影物镜小比例模型,光学系统和技术指标要求分别如图1和表1所示。

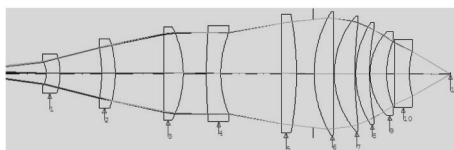


图1 投影物镜小比例模型光学系统图

Fig.1 Optical system diagram of projection lens small scale model

表1 投影物镜小比例模型技术指标要求

Table 1 Qualifications of projection lens small scale model

Qualifications	Wave length	Focal length	Image NA	Index	Total length	Design wave front error (RMS)	Expect wave front error (RMS)
Values	632.8 nm	50 mm	0.5	1.457021	530 mm	3 nm	45 nm

在经过物镜设计、加工、集成装配和可调机构像质补偿后,系统波像差已经优化到29.6 nm(RMS),已满足预期指标要求,波像差如图2所示。但对于光刻物镜对波像差的要求而言,仍有较大差距,需要进一步开展像质优化方法的研究。

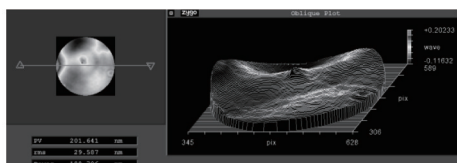


图2 系统波像差检测结果

Fig.2 Test results of wavefront error in system

## 3 系统波像差的泽尼克分析

由于条纹泽尼克多项式和光学检测中观测到的像差多项式的形式是一致的,因而它常常被用来描述波前特性。通常会使用幂级数展开式的形式来描述光学系统的像差,波前像差函数 $W(\rho, \theta)$ 为

$$W(\rho, \Theta) = \bar{W} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n Q_n^0(\rho) + \sum_{m=1}^n Q_n^m(\rho)(\rho)^m (B_{nm} \cos m\Theta + C_{nm} \sin m\Theta)], \quad (1)$$

式中 $\bar{W}$ 表示平均波前差, $A_n$ 、 $B_{nm}$ 、 $C_{nm}$ 是多项式展开系数。一般情况,波前是不对称的,因此同时包含两种三角函数形式。

为了进一步优化波像差,利用条纹泽尼克多项式对图2中波像差组成成分进行分析,结果如图3所示。

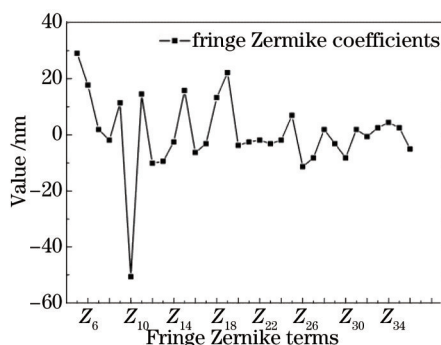


图3 条纹泽尼克各项系数分布

Fig.3 Coefficients distribution of each fringe Zernike

从图3可以看出,  $Z_{10}$ 项最大, 对应X方向三叶像差, 将该像差提取出来, 如图4所示, 可见仅  $Z_{10}$ 项就占全部像差的60%, 与图2的对比也可看出, 波前图中三叶像差明显, 是像质进一步优化的首要目标。

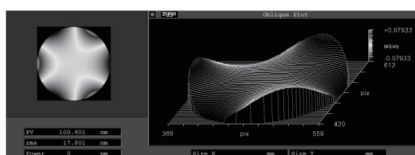


图4  $Z_{10}$ 项三叶像差大小

Fig.4 Value of  $Z_{10}$ - trefoil aberration

## 4 面形精修技术的运用

面形精修技术依托于离子束加工设备, 主要应用在光学加工领域, 属于非接触式抛光。其最大的优点在于具有亚纳米的加工精度。此外, 离子束加工具有加工周期短, 收敛速度快, 而且不需要抛光液等优点, 是目前高精度光学镜片表面面形加工的先进技术<sup>[4,15]</sup>。离子束加工设备不仅能够有效校正低频误差(如泽尼克像差)和中频误差(波纹度), 而且不破坏高频误差(粗糙度), 广泛应用于光刻投影物镜、天文望远镜和其他高分辨率成像系统中。

选择图1中投影物镜的第二个镜片(Lens2)上表面为精修面开展分析研究, 先需要确定精修量。

### 4.1 面形精修去除量的确定

所研究的光学系统的波像差是由高精度斐索干涉仪测量得到的。影响波面像差的是光线在系统中传播的光程, 考虑到光线在空气中和玻璃介质中传播的光程相差 $(n-1)$ 倍( $n$ 为光学镜片在斐索干涉仪测量光波长下的折射率, 参照表1), 可以算出面形精修的去除量应为系统波像差的 $1/(n-1)$ 倍。此外, 根据图1光线在系统中没有产生中间像, 可以判断提供给离子束加工设备应去除的面形与波像差形状相同。由此得到Lens2表面上的理论去除量如图5所示。

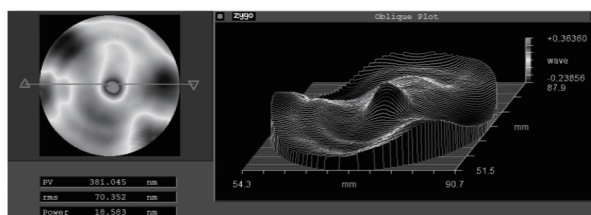


图5 Lens2表面理论去除量

Fig.5 Theoretical remove amount of Lens2 surface

### 4.2 仿真实证

将图2中的波像差代入到Codev软件光学系统的出瞳处, 得到失调后的系统。将Lens2上表面设置为泽尼克面, 并在优化参量中选择条纹泽尼克对应的系数, 将各系数设为变量进行优化。优化前后对比结果如图6所示。其中,  $Z_{10}$ 项由 $-50.6$  nm减小到 $15.2$  nm。仿真结果表明这种像质补偿方法可行。

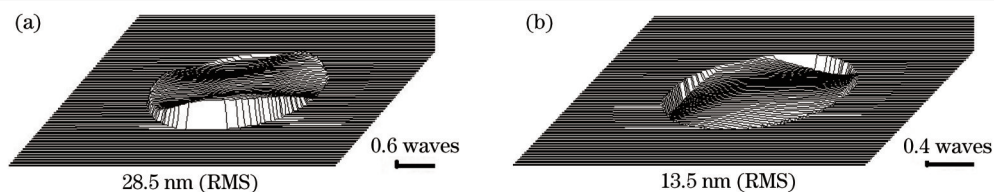


图6 面形精修前后仿真结果。(a) 优化前波像差; (b) 优化后波像差

Fig.6 Simulation results before and after re-polishing. (a) Wave-front error before optimization; (b) wave-front error after optimization

## 5 面形精修验证实例

面形精修实验操作流程如图7所示。

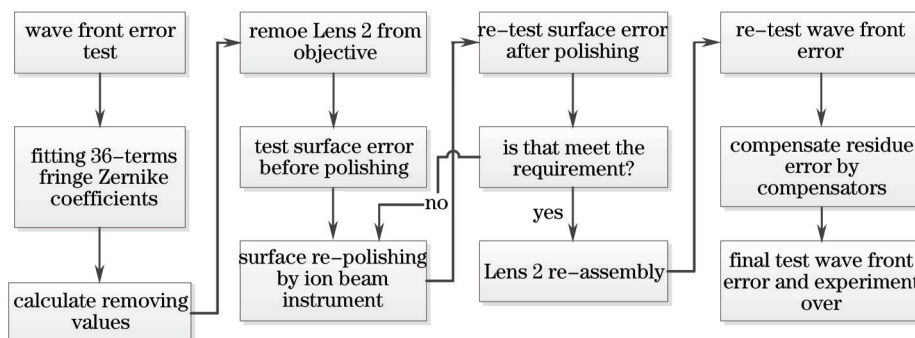


图7 面形精修实验流程

Fig.7 Chart of surface re-polishing experiment

图7流程简述如下:根据测量得到的系统波像差数据,拟合得到36项条纹泽尼克多项式,计算得到精修去除量。在系统中拆卸待精修的Lens2,对被测面进行面形检测,利用离子束加工设备精修面形。精修后进行面形复测,并与预期结果对比,如果满足需求,则进行Lens2单镜集成及在系统中复位。如果精修面形未达到预期效果,则需要进行第二轮,乃至多轮离子束加工,直到收敛到预期值。最后进行波像差复测,根据测试结果利用调节机构补偿残余装配误差,波像差终检,验证结束。

实际加工中,仅经过一轮面形精修,就达到预期面形,精修前、后Lens2面形检测结果如图8所示,与图2比较可以看出,Lens2去除面形与系统波像差检测面形一致,说明面形精修的方向与大小正确。

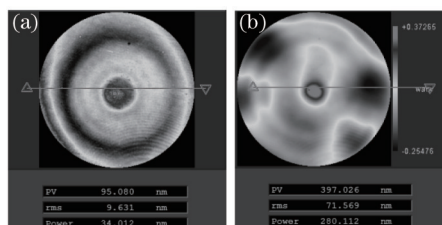


图8 面形精修前后Lens2面形。(a) 精修前面形; (b) 精修后面形

Fig.8 Surface of Lens2 before and after re-polishing. (a) Surface before polishing; (b) surface after polishing

将Lens2在物镜中复位,并测试了系统波像差,初测值为18.2 nm(RMS),其中含有Lens2复位装配误差,利用计算机辅助装调,计算得到调节机构的补偿值,在补偿这些残差后,系统波像差复测结果如图9所示。由图可知,精修后系统波像差达到12.7 nm(RMS)。与预期的13.5 nm(RMS)比较接近,精修前、后条纹泽尼克系数对比如图10所示,可以看出,三叶像差明显减小。实验证明,通过面形精修技术,可以使物镜像质得到进一步提升。

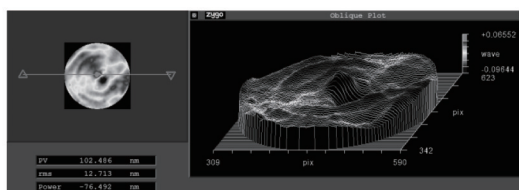


图9 精修后系统波像差检测结果

Fig.9 Wave-front error testing results after re-polishing

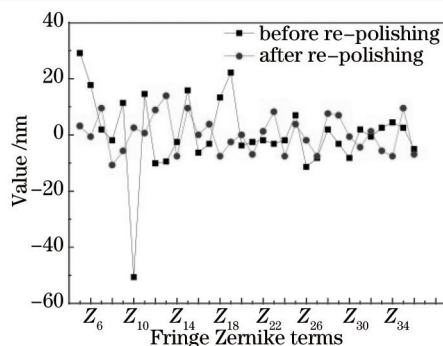


图 10 精修前后泽尼克系数对比

Fig.10 Comparison of Zernike coefficients before and after re-polishing

## 6 结 论

针对三叶像差为低阶像差的特点,利用离子束面形精修技术能够对低阶像差进行很好地校正。提出了用面形精修技术来补偿调节机构难以补偿的这类高阶像差。分析和实验结果表明,通过对系统中一个表面进行有针对性地面形精修,三叶像差得到了较好地校正。这种方法有利于进一步优化极小像差物镜系统的成像质量。

## 参 考 文 献

- 1 Bruning J H. Optical lithography: 40 years and holding[C]. Advanced Lithography. International Society for Optics and Photonics, 2007: 652004.
- 2 Ikezawa H, Ohmura Y, Matsuyama T, *et al.*. A hyper-NA projection lens for ArF immersion exposure tool[C]. SPIE 31st International Symposium on Advanced Lithography. International Society for Optics and Photonics, 2006, 6154: 615421.
- 3 Marinescu O, Bociort F. Saddle points in the merit function landscape of lithographic objectives[C]. Optical Systems Design 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005, 5962: 59620T.
- 4 Malone R M, Capelle G A, Cox B C, *et al.*. Design, assembly, and testing of a high-resolution relay lens used for holography with operation at both doubled and tripled Nd: YAG laser wavelengths[C]. SPIE Optical Engineering Applications. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7433: 74330L.
- 5 Kumler J J, Neer M. Alignment technique for precision optical assemblies[C]. SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 1993: 67-76.
- 6 Matsuyama T, Shibasaki Y. Microlithographic lens for DUV scanner[C]. International Optical Design Conference 2002. International Society for Optics and Photonics, 2002: 170-174.
- 7 Matsuyama T, Shibasaki Y, Ohmura Y, *et al.*. High-NA and low-residual-aberration projection lens for DUV scanner[C]. SPIE's 27th Annual International Symposium on Microlithography. International Society for Optics and Photonics, 2002: 687-695.
- 8 Shibasaki Y. Optical element holding apparatus. U.S. Patent: 7,154,684[P]. 2006-12-26.
- 9 Zhao Yang, Wang Ping, Zhao Lei, *et al.*. Selecting system compensators for small scale projected objective using displaced parameters vector[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822001.  
赵 阳, 王 平, 赵 磊, 等. 利用失调量向量选择投影物镜小比例模型系统补偿量[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822001.
- 10 Wu Jianfen, Lu Zhenwu, Zhang Hongxin, *et al.*. Optimized dwell time solution for optics in ion beam figuring[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 192-197.  
武建芬, 卢振武, 张洪鑫, 等. 光学元件离子束加工驻留时间优化求解[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 192-197.
- 11 Ma Zhanlong, Sui Yongxin. Large optical surface error figuring by ion beam[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0122001.  
马占龙, 隋永新. 应用离子束修正大面形误差光学元件[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0122001.
- 12 Gu Y. Correction of full spatial frequency errors with ion beam figuring[C]. 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (AOMATT 2012). International Society for Optics and Photonics, 2012, 8416: 84161M.
- 13 Wang J. Ultraprecision optical fabrication on fused silica[C]. 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (AOMATT 2012). International Society for Optics and Photonics, 2012, 8416: 841620.

- 14 Zhou Lin, Dai Yifan, Xie Xuhui, *et al.*. Machining reachability in ion beam figuring[J]. Optical and Precision Engineering, 2007, 15(2): 160-166.  
周 林,戴一帆,谢旭辉,等. 光学镜面离子束加工的可达性[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 160-166.
- 15 Dai Yifan, Zhou Lin, Xie Xuhui, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by ion beam[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(6): 1131-1135.  
戴一帆,周 林,谢旭辉,等. 应用离子束进行光学镜面确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2008, 28(6): 1131-1135.

栏目编辑: 苏 岑