

# 光刻物镜压力双膜片轴向调节机构优化设计

孙 振 张德福 华洋洋

(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** 针对光刻物镜对镜片间隔调节精度高、范围大的需求,提出一种利用气体压差提供驱动力的压力双膜片轴向调节机构。并对该轴向调节机构的不同膜片宽度、厚度以及凸台宽度进行优化分析,在特定压力范围内得到调节机构的优化尺寸参数,分析调节机构在优化后的固有频率。同时分析在轴向调节过程中引入的镜片面形误差,得到镜片面形的 Zernike 系数。结果表明该压力双膜片轴向调节机构的镜片面形误差主要为 power 项和球差项,面形峰谷(PV)值优于 13.45 nm,均方根(RMS)值优于 2.851 nm,满足光刻物镜对调节机构镜片面形的要求。

**关键词** 光学设计; 光刻物镜; 轴向调节机构; 双膜片; 气压

**中图分类号** TH703 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.s116001

## Optimization Design for Bi-Membrane Pressure Axial Adjusting Mechanism of Lithograph Objective

Sun Zhen Zhang Defu Hua Yangyang

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

**Abstract** A bi-membrane axial adjusting mechanism is designed to meet the requirement of high precision and long distance in projection objective. The mechanism uses pressure for driving force. And optimization of different widths and thicknesses of diaphragms and width of the convex. It is optimized to gain the optimization parameters at certain pressure range. And then the frequency of mechanism is checked. The figure error of lens is analyzed to gain the Zernike coefficient when the mechanism is moving. The result indicates that the main figure error is power and sphere. The peak-to-valley (PV) of the low surface figure is better than 13.45 nm, and the root-mean-square (RMS) is better than 2.851 nm. The axial adjusting mechanism satisfies the requirement of lithograph projection objective.

**Key words** optical design; lithograph objective; axial adjusting mechanism; bi-membrane; pressure

**OCIS codes** 000.3110; 110.5220; 120.4640

## 1 引 言

大规模集成电路的快速发展,对光刻投影物镜的整体性能提出了较高的要求。为了满足严格的套刻精度需求,需要光刻物镜具有调节倍率的功能。该功能一方面补偿系统在制造和工作中的倍率变化,同时还能通过改变倍率来适应套刻过程中的倍率偏差<sup>[1-2]</sup>。双远心结构的光刻投影物镜,要求特定的光学元件具有轴向调节功能来实现系统的倍率调节。目前光刻物镜的轴向调节机构主要采用多处柔性弹片的形式<sup>[3]</sup>,该结构对结构加工一致性的要

求十分苛刻。同时采用多个压电陶瓷驱动器<sup>[4]</sup>或电机分布在镜框周围作为调节机构的驱动部件,轴向调节时对多个驱动器的运动同步性要求较高,并且这两类驱动器在运动时会产生热量,不利于物镜周围的温度控制<sup>[5-6]</sup>。

针对目前光刻投影物镜的轴向调节机构存在的问题,提出了一种利用气体压差提供驱动力的压力双膜片轴向调节机构。该机构将镜框内部设计为密闭空腔,利用上下膜片实现气体密封和运动导向功能。内镜框上设计环形凸台伸入到密闭空腔中,用于驱动

收稿日期: 2013-09-01; 收到修改稿日期: 2013-10-01

基金项目: 国家重大科技专项 02 专项(2009ZX02005)

作者简介: 孙 振(1987—),男,硕士,助理研究员,主要从事光机结构系统设计与装调等方面的研究。

E-mail: sunzhen176@163.com

内镜框轴向运动。本文以轴向调节行程、调节精度和机构固有频率为指标,利用有限元分析手段对调节机构进行优化分析,得出膜片宽度、厚度和凸台宽度的优化参数。同时对机构调节过程中引入的镜片面形误差进行分析,得出镜片面形 Zernike 系数及主要误差项,结果显示调节过程中面形误差主要为 power 项和球差项,面形均方根(RMS)值优于 2.851 nm,满足光刻物镜的对调节机构镜片面形的要求。

## 2 轴向调节机构设计

针对光刻投影物镜系统中的平凸透镜设计轴向

调节机构,该镜片采用 10 点弹片支撑和胶粘方式。为了研究调节机构对镜片面形的影响,分析中不考虑胶层厚度和胶粘力的作用,该镜片尺寸如图 1 所示,镜片下表面通光孔直径为 144 mm,调节机构模型如图 2 所示。

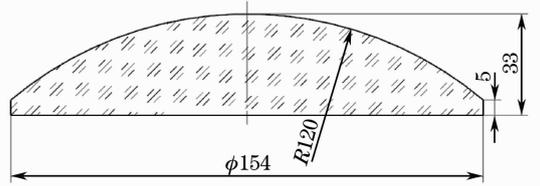


图 1 轴向调节机构镜片

Fig. 1 Lens of axial adjusting mechanism

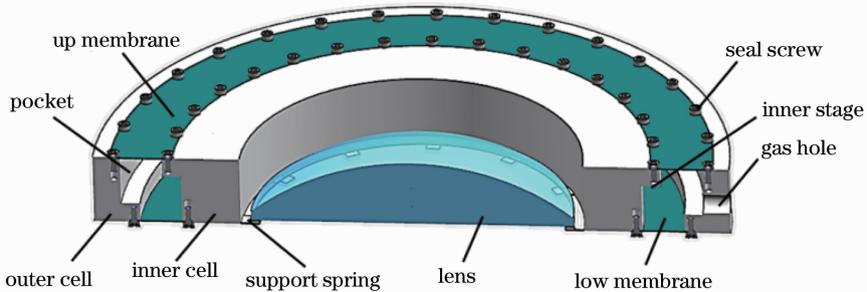


图 2 轴向调节机构模型

Fig. 2 Model of axial adjusting mechanism

轴向调节机构由内框、外框和上下膜片组成。内框由多点支撑弹片和驱动凸台组成,外框上设计非功能性凸台,用于保证上下膜片的宽度一致。圆环形双膜片作为轴向运动的导向部件,提供轴向运动自由度,同时限制内框的径向运动。膜片与内外

框之间采用密封垫圈和周向密布的螺钉连接,保证调节机构的气密性。由内框、外框和双膜片形成环形腔体,通过外框上的气孔与气源相通,改变供给气体的压力实现轴向调节机构的运动,其运动简图如图 3 所示。

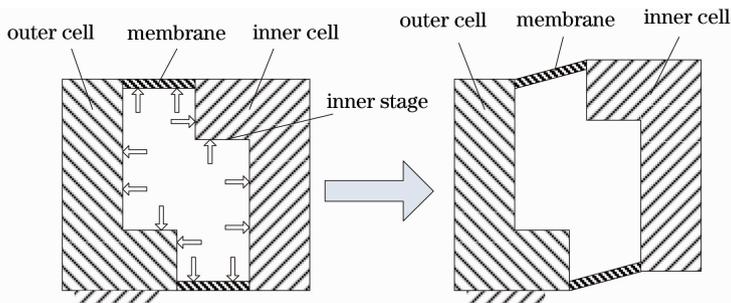


图 3 轴向调节机构运动简图

Fig. 3 Motion schematic of axial adjusting mechanism

腔体内通入一定压力气体后,对组成腔体的内外镜框及膜片产生正压力,压力大小由气体压强和受压面积决定。由于膜片的宽度和厚度均相同,作用在上下膜片处的压力大小相等,方向相反,压力仅造成上下膜片的受压变形,对调节机构的运动没有贡献。内外镜框上均设计受力凸台,外镜框底部固定,使得外镜框凸台受力后固定不动,内镜框凸台受

力后产生向上的运动,通过环形膜片的导向作用使内镜框沿轴向运动,带动镜片实现轴向调节功能。

## 3 轴向调节机构优化设计与分析

轴向调节机构中有效压力作用在内镜框凸台上,在上下膜片的约束和导向作用下,内镜框带动镜片做轴向运动,其运动行程和精度与有效压力和膜

片轴向刚度有关。有效压力由气压和内框凸台的受力面积决定。膜片为薄壁圆环形结构,其横截面为矩形,在选定材料的前提下,膜片轴向刚度仅与膜的宽度和厚度有关,所以轴向调节机构的优化设计主要针对内框凸台宽度、膜片宽度和厚度等参数进行。调节机构的调节精度与气体压力的调节精度有关,在优化设计时需要同时考虑,轴向调节机构的有限元(FEM)模型如图 4 所示,在外框底部施加固定约束,在腔体内所有表面施加压力载荷,内外框与膜片之间和内框与镜片之间的连接使用粘接边界条件。材料属性如表1所示,轴向调节机构优化条件

及目标如表 2 所示,各参数变化对调节机构的行程和精度的影响如图 5~11 所示。

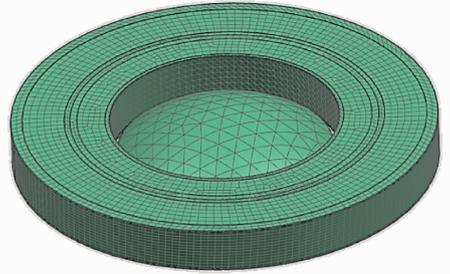


图 4 调节机构有限元模型

Fig. 4 FEM of adjusting mechanism

表 1 材料属性表

Table 1 Material property

Parts	Material	Density /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Elastic modulus /GPa	Poisson ratio	Yield strength /MPa
Lens	SiO <sub>2</sub>	2.2	73	0.17	
Cell	Stainless 304	7.9	193	0.27	290
Membrane	Stainless 304	7.9	193	0.27	290

表 2 机构参数优化条件及目标

Table 2 Condition and goal of optimization for mechanism property

Min pressure /Pa	Max pressure /Pa	Adjusting distance / $\mu\text{m}$	Adjusting precision /nm	Frequency /Hz
100	$0.1 \times 10^6$	90	10	$>100$

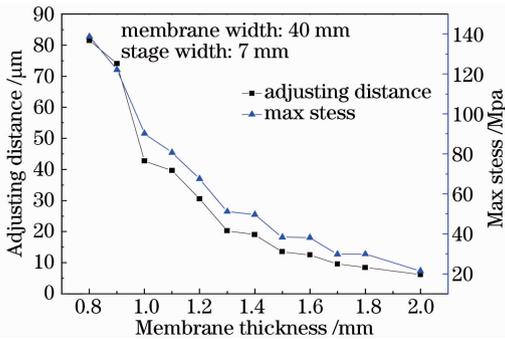


图 5 膜片厚度对调节行程的影响

Fig. 5 Influence of changing membrane thickness to distance

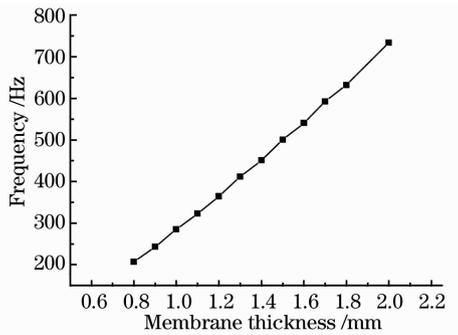


图 7 膜片厚度对固有频率的影响

Fig. 7 Influence of changing membrane thickness to frequency

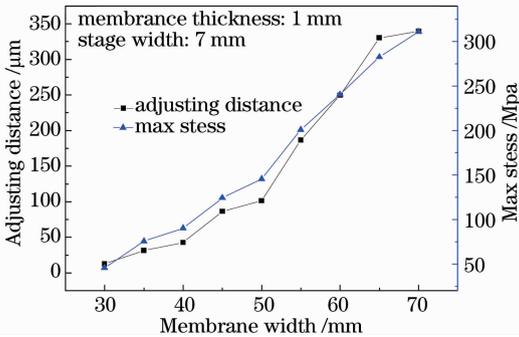


图 6 膜片宽度对调节行程的影响

Fig. 6 Influence of changing membrane width to distance

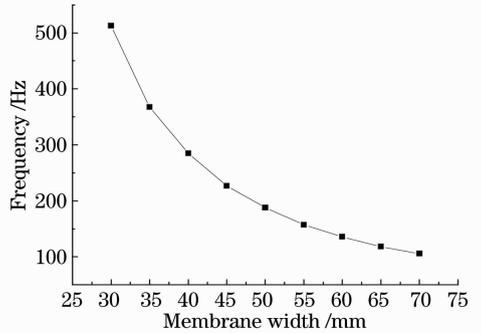


图 8 膜片宽度对固有频率的影响

Fig. 8 Influence of changing membrane width to frequency

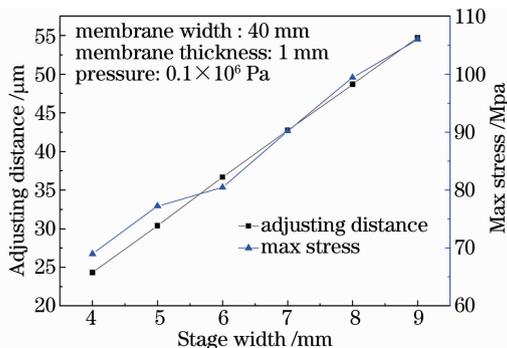


图 9 凸台宽度对调节行程的影响

Fig. 9 Influence of changing stage width to distance

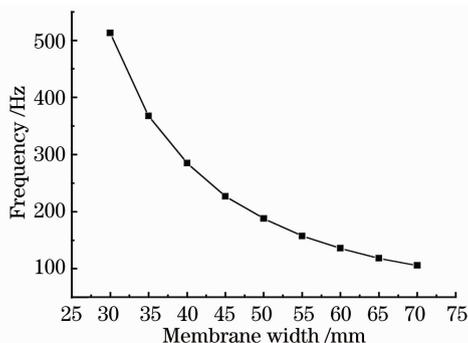


图 10 凸台宽度对固有频率的影响

Fig. 10 Influence of stage width to frequency

由图 8 可以看出,膜片宽度对机构固有频率的影响十分显著,为了满足调节机构固有频率大于

表 3 优化后参数及满足度

Table 3 Optimized parameters and satisfaction

Membrane thickness /mm	Membrane width /mm	Stage /mm	Adjusting distance /μm	Adjusting precision /nm	Frequency /Hz
1	50	7	101.5 > 90	10.15 ≈ 10	187.8 > 100

#### 4 调节过程的镜片面形分析

轴向调节机构依靠结构件变形的的方式实现小行程、高精度的运动要求。无论是多点驱动方式还是环形驱动方式<sup>[3]</sup>,都需要考虑结构件变形对镜片面形的影响,图 12 显示了当气压为  $0.1 \times 10^6$  Pa 时,调节机构镜片下表面的面形图,其面形 Zernike 系数如图 13 所示。

由镜片下表面 Zernike 系数可知,面形误差主要由 power 项和球差项组成,还含有微小的象散项,图 12 所示当去除 power 项后,镜片下表面面形峰谷(PV)值为 13.45 nm,RMS 值为 2.851 nm。由于通过镜片的轴向移动可以改善系统球差,所以在实际使用中该轴向调节机构在补偿光学系统像差时也能实现球差的自补偿,在调节过程中该镜片的面

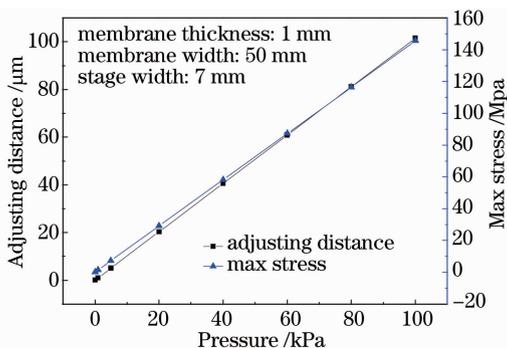


图 11 气体压力对调节行程的影响

Fig. 11 Influence of changing pressure to distance

100 Hz 的要求,膜片宽度不能大于 70 mm。由图 5、图 7 和图 9 可知,膜片厚度在 0.8~1.5 mm 范围内,调节行程急剧下降;膜片宽度在 40~70 mm 范围内,调节行程急剧增加,凸台宽度与调节行程成线性关系,当膜片厚度为 1 mm,膜片宽度为 50 mm 时,调节机构行程为 101.5 μm,满足调节行程要求。同时考虑到调节精度的要求,由图 11 可知当机构参数确定时,调节行程与气压成线性关系,其线性方程为  $y = 1.015x$ ,  $y$  为调节行程,  $x$  为气体压强,由最大行程可以推算出机构的调节精度,当调节行程为 101.5 μm 时,调节精度为 10.15 nm,满足调节精度要求,综合以上各约束条件,机构优化后参数及满足度如表 3 所示。

形 RMS 可优于 2.851 nm。

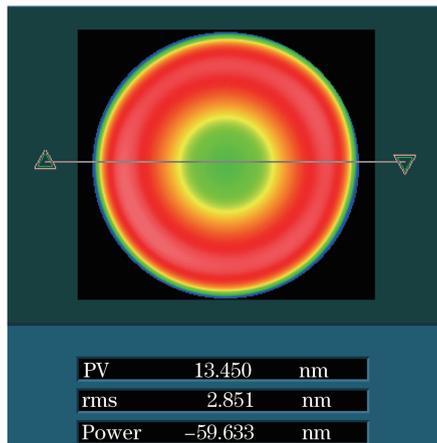


图 12 镜片下表面面形图

Fig. 12 Figure of low surface of lens

```

Zernike coefficients from 43384 data points
Order: 10th  Terms: 36  rms: 0.000
-0.011  0.001  0.000  -0.047
-0.000  0.001  0.000  0.000  -0.010
-0.000  0.000  -0.000  0.000  0.000  0.000  -0.003
-0.000  0.000  -0.000  0.000  -0.000  0.000  0.000  0.000  -0.001
-0.000  0.000  -0.000  0.000  -0.000  0.000  -0.000  0.000  0.000  0.000  -0.000

```

图 13 镜片下表面面形 Zernike 系数

Fig. 13 Zernike coefficient of low surface figure

## 5 结 论

针对光刻物镜对镜片间隔调节精度高、范围大的需求,提出了一种利用气体压差提供驱动力的压力双膜片轴向调节机构。通过对该轴向调节机构的优化设计,得到满足机构调节行程、精度和固有频率要求的优化参数,并对该优化参数下调节机构运动过程中引入的镜片面形误差进行分析,结果表明该镜片下表面的面形误差主要为 power 项和球差项,去掉 power 项后,面形 RMS 可优于 2.851 nm,满足光刻物镜对镜片面形要求。

### 参 考 文 献

- 1 Xu Weicai. Optical Design and Imaging Performance Compensation for the Lithographic Lens [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2011. 35-36.  
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计和像质补偿[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011. 35-36.
- 2 Xu Weicai, Huang Wei, Yang Wang, *et al.*. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens

[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122003.

许伟才, 黄 玮, 杨 旺, 等. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122003.

- 3 Guo Kang, Gong Yan, Ni Mingyang, *et al.*. Design of a monolithic apparatus for the fine axial adjusting mechanism of optical element[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s122002.  
郭 抗, 巩 岩, 倪明阳, 等. 光学元件一体化精密轴向调节机构的设计[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s122002.

- 4 Wang Xueliang, Gong Yan. Dynamic performance of the PZT driver used in a lithographic objective[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1071-1075.

王学亮, 巩 岩. 光刻物镜中压电陶瓷驱动器的动态性能研究[J]. 光子学报, 2012, 41(9): 1071-1075.

- 5 Nie Hongfei, Li Xiaoping, Zhang Lingli. Temperature control algorithm for optical lithography projection lens [J]. China 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.

- 6 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. 大时间热响应常数物镜的超高精度温度控制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 108-114.

栏目编辑: 韩 峰