

365 nm 光刻照明系统中变焦系统的设计及公差分析

苏朋

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 照明系统是投影光刻曝光光学系统的重要组成部分, 它实现的功能是为掩模面提供高均匀性照明、控制曝光剂量以及不同照明模式。变焦系统作为光刻照明系统的重要组成部分, 对提高整个光刻机的性能起着至关重要的作用。文中针对紫外光刻照明系统的特点, 采用 CODE V 软件完成了波长 365 nm, 入瞳直径 $\Phi 33$ mm, 像方远心度 ≤ 10 mrad, 畸变 $\leq \pm 2\%$ 近紫外光刻照明系统中变焦系统的设计, 分析了变焦系统的误差源对系统光瞳性能的影响, 结合变焦系统的设计方案和实际加工能力, 给出单面厚度公差需小于 20 μm , 动件移动精度小于 0.5 nm, 各透镜偏心公差小于 0.02 mm, 各透镜倾斜公差控制在 1' 之内。制定公差合理、可行, 满足了紫外光刻照明系统高均匀性、高能量利用率的要求。

关键词: 紫外光刻; 高均匀性照明; 分辨率; 光学设计; 公差分析

中图分类号: TB852 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210524

Design and tolerance analysis of the zoom system in 365 nm UV lithography illumination system

Su Peng

(Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang 471000, China)

Abstract: The illumination system is an important part of the projection lithography exposure optical system. Its function is to provide high uniformity illumination and control the exposure dose and different illumination modes for the mask surface. As an important part of the lithography lighting system, the zoom system plays a vital role in improving the performance of the entire lithography machine. According to the characteristics of the ultraviolet lithography illumination system, this paper uses CODE V software to complete the design of the zoom system in the near ultraviolet lithography illumination system with a wavelength of 365 nm, an entrance pupil diameter of $\Phi 33$ mm, an image telecentricity ≤ 10 mrad, and a distortion $\leq \pm 2\%$. The effect of the error source of the zoom system on the pupil performance of the system is analyzed, combined with the design scheme of the zoom system and the actual processing capability, gives a single-sided thickness tolerance of less than 20 μm , a moving part movement accuracy of less than 0.5 nm, and an eccentric tolerance of less than 0.02 mm for each lens. The tilt tolerance of each lens is controlled within 1'. The tolerances are reasonable and feasible, and meet the requirements of high uniformity and high energy utilization of the UV lithography illumination system.

Key words: ultraviolet lithography; high uniformity illumination; resolution; optical design; tolerance analysis

收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-09-08

作者简介: 苏朋, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事光电探测总体设计方面的研究。

0 引言

自 20 世纪 80 年代, 16 兆 DRAM 的产生, 标志着世界开始进入超大规模集成电路 (VLSI) 阶段, VLSI 成为所有高科技领域发展的基础^[1]。集成电路的集成度按照摩尔定律 (Moore's Law) 增长, 每隔 18~24 个月电路上承载的元件数量就会增加一倍, 到 2014 年, 英特尔宣布了行业首个 14 nm 处理器, 摩尔定律还将继续驱动集成电路的发展。先进的超大规模集成电路的制造是一个庞大的系统工程, 它包括五个制造阶段: (1) 硅片制备: 包括晶体生长、滚圆、切片及抛光等工序; (2) 硅片制造: 包括硅片清洗、成膜、光刻、刻蚀和掺杂等工序; (3) 硅片测试: 通过测试识别有缺陷的芯片, 使其被淘汰而不进入下一道工艺流程; (4) 装配与封装: 包括将硅片切割成芯片、压焊和包封, 器件封装一般采用金属封装、陶瓷封装、陶瓷金属封闭和塑料封装; (5) 终测: 对每一个完成封装的集成电路进行测试, 确保芯片的功能和质量。全部研制过程涉及约 800 道工序, 且某些工序在制备过程中重复使用多次^[2-5]。其中, 硅片制造阶段是将一整套集成电路永久刻蚀在裸露的硅片上的过程。而光刻被认为是大规模集成电路制造中的核心步骤, 把每个晶体管元件越做越小的关键是先进的光刻技术, 新一代集成电路的出现总是代表当时最先进的光刻技术水平^[6-9]。从这个意义上讲, 光刻技术是集成电路制造工艺发展的驱动力, 相比其他单个制造工艺而言, 光刻对芯片性能的发展有着革命性的贡献。在工业生产中应用最广泛的是分辨率为 100~500 nm 的芯片, 该分辨率光源波长为 365 nm。文中针对近紫外光刻照明系统中变焦系统进行了设计, 并对其误差源进行详细分析最终确定公差范围, 在掩模面上可实现高均匀照明, 对改善最终的曝光质量具有重要的意义^[10-12]。

1 变焦系统的设计

变焦系统的设计要求中心波长 365 nm, 入瞳直径 $\Phi 33$ mm, 视场角 $\pm 1.35^\circ$, 像面直径 $\Phi 30\sim 120$ mm, 后工作距离 ≥ 200 mm, 像方远心度 ≤ 10 mrad, 畸变 $\leq \pm 2\%$ 。根据变焦系统的设计要求, 采用 CODE V 软件设计的变焦系统光路如图 1 所示, 设计结果和满意度分析如表 1 所示。

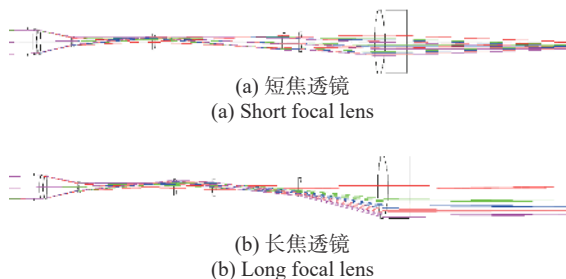


图 1 变焦系统的光路图

Fig.1 Optical path diagram of the zoom system

表 1 设计结果与设计要求对照表

Tab.1 Comparison table of design results and design requirements

Parameters	Design requirements	Design results
Wavelength/nm	365	365
Entrance pupil diameter/mm	33	33
Field/(°)	± 1.35	± 1.35
Image surface diameter/mm	$\Phi 30\sim 120$	$\Phi 30\sim 120$
After working distance/mm	≥ 200	300
Image surface telecentric degrees/mrad	≤ 10	≤ 5.1
Distortion	$\leq \pm 2\%$	$\leq \pm 0.6\%$

2 变焦系统的误差分析

在分析变焦系统的误差源对系统的影响时主要考虑对光瞳性能的影响, 包括相干因子大小、远心度 (质心变化)、椭圆度和极平衡性。不同误差源对光瞳性能的影响是不同的, 具体分析如下。

2.1 单面厚度公差分析

变焦镜组的单面厚度误差主要影响各个 zoom 的焦距, 对各 zoom 的远心度、视轴移动没有影响, 图 2、3

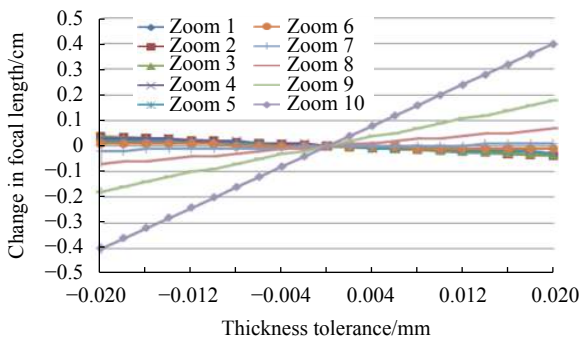


图 2 第 2 面厚度误差对焦距的影响

Fig.2 Influence of the thickness error of the second surface on the focal length

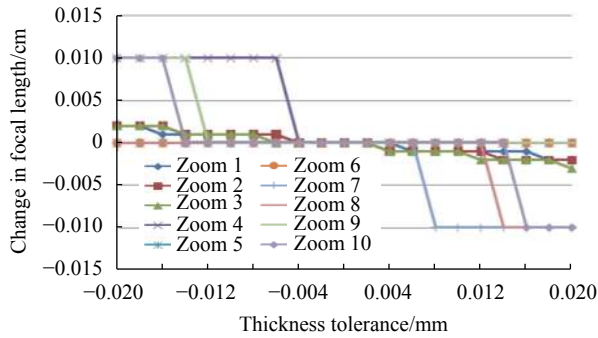


图 3 第 15 面厚度误差对焦距的影响

Fig.3 Influence of the thickness error of the 15th surface on the focal length

分析了变焦镜组第 2 面~第 15 面 (第 1 面为光阑面) 的厚度误差对各 zoom 焦距的影响。

从以上分析可以看到, 前组的各面厚度误差对焦距的影响大于后组各面的厚度误差, 其中第 2 片的厚度 (第 4 面) 和第 2、3 片透镜间厚度 (第 5 面) 的误差对焦距的影响最大。厚度误差 20 μm 时最大的焦距变化量为 4 mm。由于焦距的变化量需控制在 5.4 mm 内, 因此厚度公差需控制在 20 μm 以内。

2.2 动件移动定位公差分析

变焦镜组内有 3 片动件, 其移动定位的误差会造成各个 zoom 的焦距误差, 因此, 需分析动件的移动定位误差对焦距的影响, 如图 4 所示。

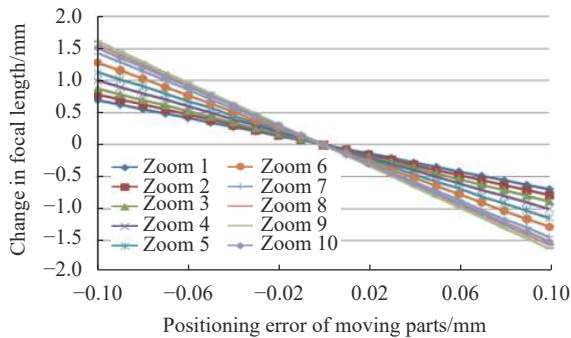


图 4 动件 1 移动精度对焦距的影响

Fig.4 Influence of the moving accuracy of moving part 1 on the focal length

通过以上对动件移动精度的分析可知, 变焦系统的 3 个运动件移动精度要求基本相同。动件的移动精度为 0.5 mm 时, 焦距变化大约为 2 mm。从以上动件精度分析、面间隔变化分析等可知, 动件的移动精度控制在 0.5 mm 以内即可满足要求。

2.3 各透镜偏心公差分析

各透镜的偏心差主要影响变焦镜组的视轴移动、远心度和 90% 能量包围圆半径。因此分析了个透镜偏心差对这些参数的影响, 如图 5~7 所示。

通过分析发现, 透镜的偏心误差对远心度和能量包围圆半径的影响较小, 对视轴移动的影响较明显, 偏心 0.02 mm 最大的视轴移动量为 0.4 mm 左右, 但

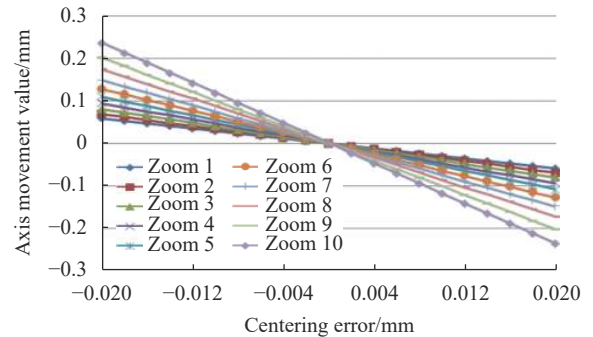


图 5 透镜 1 偏心误差对视轴移动的影响

Fig.5 Influence of eccentricity error of lens 1 on the visual axis movement

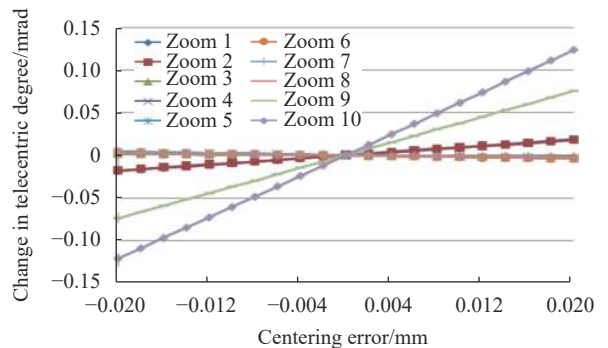


图 6 透镜 1 偏心误差对远心度的影响

Fig.6 Influence of eccentricity error of lens 1 on telecentric degree

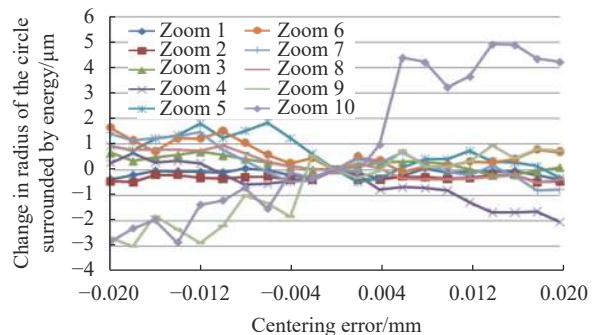


图 7 透镜 1 偏心误差对 90% 能量包围圆半径的影响

Fig.7 Influence of eccentricity error of lens 1 on the radius of 90% energy encircling circle

仍然在可接收的范围内,因此,透镜的偏心误差控制在 0.02 mm 之内即可。

2.4 各透镜倾斜公差分析

各透镜的倾斜误差主要影响变焦镜组的视轴移动、远心度和 90% 能量包围圆半径,因此分析了各透镜的倾斜误差对这些参数的影响,如图 8~10 所示。

通过分析发现,透镜的倾斜误差对视轴移动、远

心度和能量包围圆半径的影响都很小,公差很松,倾斜 1' 以上各个参数的变化量都还很小,因此,各透镜的倾斜误差控制在 1' 之内即可。

3 测试结果

对于相干因子约为 0.16 的传统照明,追迹 10 亿条光线,计算获得掩模面能量分布 y 向积分沿 x 方向的光能分布曲线,如图 11 所示,从仿真计算可得掩模面光强不均匀性值为 1.95%,满足指标要求。

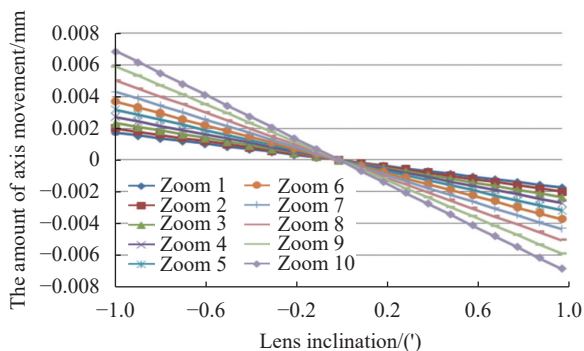


图 8 透镜 1 倾斜误差对视轴移动的影响

Fig.8 Influence of the tilt error of lens 1 on the visual axis movement

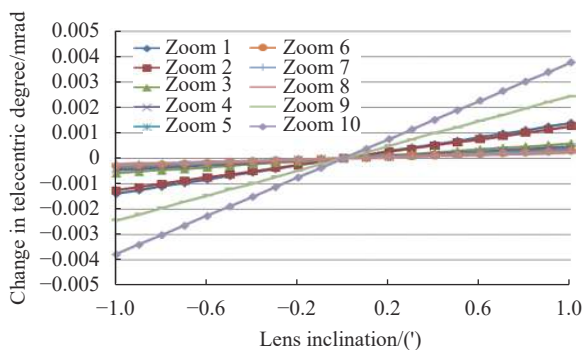


图 9 透镜 1 倾斜误差对远心度的影响

Fig.9 Influence of tilt error of lens 1 on telecentric degree

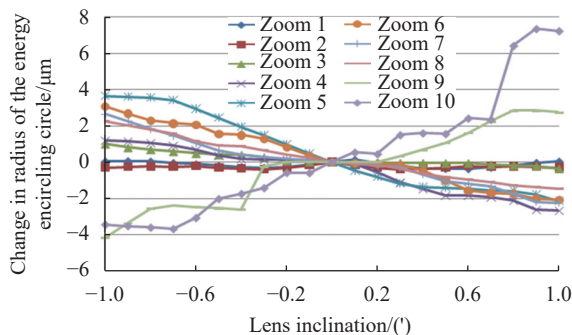


图 10 透镜 1 倾斜误差对 90% 能量包围圆半径的影响

Fig.10 Influence of the tilt error of lens 1 on the radius of the 90% energy encircling circle

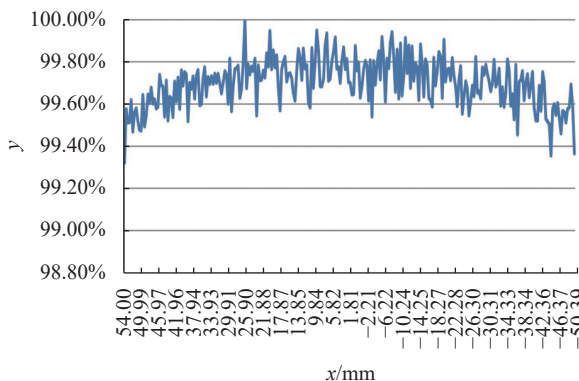


图 11 y 向积分沿 x 方向的光能分布曲线

Fig.11 y-direction integral light energy distribution curve along the x-direction

4 结束语

采用 CODE V 软件完成了紫外光刻照明系统中变焦系统的设计,设计结果为波长 365 nm,入瞳直径 33 mm,视场±1.35°,相面直径 $\Phi 30\sim 120$ mm,后工作距离 300 mm,像方远心度 ≤ 5.1 mrad,畸变 $\leq \pm 0.6\%$,各指标均满足技术要求。主要分析了变焦系统中单面厚度、动件移动精度、各透镜偏心和各透镜倾斜的误差源对系统光瞳性能的影响,结合变焦系统的设计方案和实际加工能力,给出合理的公差范围。测试结果验证了制定公差合理、可行。

参考文献:

[1] Zhao Yang. Design of complex illumination optical system for deep ultraviolet lithography[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
 [2] Dorodnyy A, Shklover V, Braginsky L, et al. High-efficiency

- spectrum splitting for solar photovoltaic [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, 136(10): 120-126.
- [3] Zhang L, Liu D, Shi T, et al. Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in non-null interferometer testing [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(35): 8501-8511.
- [4] Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 16(11): 2081-2086. (in Chinese)
- [5] Song Qiang, Zhu Jing, Wang Jian. A mixed gradient algorithm for high performance DOE design in off axis lithography illumination system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0122005. (in Chinese)
- [6] Zhang Wei, Liang Chuanyang, Li Jin, et al. Design of opticelements for beam shaping and unigorm illumination in laser digital projection display system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0805001. (in Chinese)
- [7] Li Meixuan, Li Hong, Zhang Siqi, et al. Research on mirrors of beam stabilization system for immersion lithography [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(2): 0222003. (in Chinese)
- [8] Li Meixuan, Wang Li, Dong Lianhe, et al. Development of a novel optical variable attenuator in lithography exposure system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0103002. (in Chinese)
- [9] Li Meixuan, Wang Li, Dong Lianhe. Design of aspherical zoom optical system in immersion lithography lighting system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(1): 0120002. (in Chinese)
- [10] Li Meixuan, Li Hong, Zhang Siqi, et al. Design of diffractive optical element based on discrete sampling encryption algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0916004. (in Chinese)
- [11] Li Meixuan, Kan Xiaoting, Wang Meijiao. Design and analysis on a novel uniform compensator in lithography lighting system [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(1): 105-109. (in Chinese)
- [12] Li Meixuan, Wang Meijiao, Wang Li, et al. Design and tolerance analysis of compound eye lens in lithography lighting system [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(7): 842-847. (in Chinese)