

非球面技术在浸没式光刻照明系统中的应用

李美萱^{1,2}, 王 丽¹, 董连和^{1*}, 赵 迎²

(1. 长春理工大学, 吉林 长春 130000;
2. 长春理工大学 光电信息学院, 吉林 长春 130000)

摘 要: NA1.35 浸没式光刻照明系统是超大规模集成电路的核心设备, 为了实现从 ArF 激光器发出的光束经过一系列模块传输后到达掩模面的能量满足光刻曝光系统的要求, 需要在系统中引入非球面透镜, 以减少镜片数量, 提高能量利用率。为解决现在非球面透镜具有的加工难度和控制精度不足的缺陷, 设计出一种优化控制保证非球面加工和检测的方法。在光学系统设计中优化非球面的形状, 保证非球面度, 满足非球面变化率在可加工和检测的范围内, 并控制非球面拐点的产生。照明系统中镜片数量最多的模块是耦合镜组, 通过非球面的优化, 镜片数量从 12 片减少到 9 片, 系统能量利用率提高近 25%。此外, 提高了系统像质 NA 一致性, 像方远心度, 弥散斑直径和畸变, 满足了曝光光学系统对掩模面的能量要求, 故该非球面控制技术具有良好的可加工性和可检测性。

关键词: 浸没式光刻; 照明系统; 非球面; 优化控制

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1118003

Application of aspheric technique in immersion lithography lighting system

Li Meixuan^{1,2}, Wang Li¹, Dong Lianhe^{1*}, Zhao Ying²

(1. Changchun University of Sciences and Technology, Changchun 130000, China;
2. College of Optical and Electronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

Abstract: NA1.35 immersion lithography lighting system is the core of the very large scale integrated circuit device. In order to satisfy the high resolution requirement of lithography exposure optical system, aspheric lens could be added to decrease the lenses number and increase the energy usage ratio. To solve disadvantages of processing difficulty and low control accuracy of aspheric lenses, the optimization control and testing method of aspheric surface were proposed. By optimizing the aspheric shape to guarantee steradian as well as aspheric inflection point, processing and texting control range could be also satisfied. The illumination system had the largest number of module coupling lenses. By optimization of aspheric lenses, number of lenses decreased from 12 to 9, and energy utilization increased about 25%. In addition, prosperities of NA consistency, image telecentric rate, dispersion spot diameter and distortion were

收稿日期: 2017-03-05; 修订日期: 2017-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(91338116, 11474037)

作者简介: 李美萱(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要从事先进光学系统设计与制造技术、微结构光学元件与薄膜波导术、光纤通信技术等方面的研究。Email: limeixuannuc@163.com

通讯作者: 董连和(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事先进光学系统设计与制造技术、微细加工理论与工艺技术、微光学与应用等方面的研究。Email: custdong@126.com

improved, which satisfied the exposure energy requirements on the mask surface of the optical system. So, the aspheric control technology had good processability and detectability.

Key words: immersion lithography; lighting system; aspheric surface; optimization control

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,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^[2]。而光刻技术是 VLSI 制造过程中的核心步骤,把每个元件越做越小的关键是先进的光刻技术,从这种意义上来说,光刻技术对集成电路的发展有着巨大的贡献^[3]。光学系统作为各类光电仪器的“眼睛”,是现代光电仪器和光电设备的重要组成部分,光学系统像质的好坏,直接决定着光电仪器的工作性能^[4]。现代科技对光电设备性能的要求越来越高,从而对光学系统的设计要求也越来越高^[5]。为了保证光电设备轻量化、小型化和良好的性能要求^[6],鉴于非球面良好的像差校正特性,在现代光学系统中的应用越来越广泛,而非球面的加工精度和可检测性能的好坏,直接决定了整个光学系统的性能乃至整个光电仪器的性能^[7]。因此在光学设计阶段就必须对光学系统中的非球面进行计算、分析、优化、控制,保证非球面具有良好的加工性能,这对于诸如光刻物镜这样的高精度光学系统、各类批量化生产红外、可见光和紫外光学系统在保证元件加工精度,系统性能,减小生产成本,提高生产效率等方面具有积极的意义^[8]。

结合国内非球面加工检测和高 NA 投影光刻的研究现状,当非球面度和非球面变化率较大时,将大大增加非球面的加工难度,其加工精度也难以保证,因此,根据实际加工检测能力设计出具有良好加工性能的非球面,是光学设计者面临的一个现实问题^[9]。

文中以 NA 1.35 波长为紫外 193 nm 的 45 nm 节点浸没式光刻系统中耦合镜组为实例说明非球面技术的实用性^[10]。研究的非球面技术主要是在现有加工和检测条件下,将非球面度控制在 0.5 mm 以

内,非球面变化率控制在 10 μm/mm 以内。非球面度反映的是非球面偏离球面的偏离量,非球面变化率反映的是非球面度变化的快慢,非球面拐点指非球面偏离球面的量有正有负^[11]。应用非球面技术设计出的耦合镜组在匀光系统中可实现掩模面上的高均匀照明,对改善曝光质量具有重要的意义^[12]。

1 非球面控制设计原理

非球面对于校正与视场相关的像差如像散、高阶场曲、畸变和物方远心度等具有很大优势。通过约束控制非球面的拐点程度、非球面度等参数,可使非球面具有更好的可加工和可检测性。

非球面的表述,定义在 YZ 平面内,其数学表达式为:

$$Z = \frac{y^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(1/r)y^2}} + \sum_{j=2}^n A_{2j}y^{2j} \quad (1)$$

式中: r 为非球面的曲率半径; A_{2j} 为非球面 $2j$ 阶系数; j 的取值范围为 $2 \leq j \leq 10$; k 为非球面二次系数。

非球面度的控制方法是先对非球面所在表面半口径划分成若干等分,计算非球面所在表面的球面矢高,而后计算非球面所在表面的非球面矢高,得出两者的差值,即得到用于约束控制非球面的非球面度的数学参数,最佳拟合球面半径采用 CODEV 软件中 bestsph 命令计算得出,用 R 表示。

非球面表面某一等分的球面矢高计算公式为:

$$\text{sag_asp}(h) = \frac{(1/R)h^2}{1 + \sqrt{1 - (R)^2h^2}} \quad (2)$$

利用 CODE V 软件计算非球面表面的矢高计算公式为:

$$\text{sag_asp}(h) = \text{sagf}(m, 1, 0, h) \quad (3)$$

式中: m 为非球面表面的序号; h 表示不同矢高下的非球面半口径,非球面表面的非球面矢高和球面矢高的差值计算公式为:

$$\text{sag_dif}(h) = \text{sag_asp}(h) - \text{sag_sp}(h) \quad (4)$$

即得到用于约束控制非球面非球面度的数学参数,其中, $0 \leq h \leq sd$, sd 为非球面的通光半口径, R 为

最佳拟合球面半径。

非球面变化率指非球面度变化的快慢，即对非球面度求导数可获得非球面变化率，先把非球面所在表面半口径进行若干等分，对非球面所在表面的球面矢高求导数，而后对非球面所在表面的非球面矢高求导数，二者差值即为约束非球面变化率的数学参数。

对公式(2)求导,得到最佳拟合球面部分的导数 $slop_asp(h)$ 为:

$$slop_sp(h) = \frac{d\left(\frac{(1/R)h^2}{1+\sqrt{1-(R)^2h^2}}\right)}{dh} = \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 - h^2}} \quad (5)$$

对公式 (1) 求导，得到非球面部分的导数 $slop_asp(h)$ 为:

$$slop_asp(h) = \frac{d_s}{d_h} = \frac{h/r}{1-\sqrt{1-(1+k)h^2/r^2}} + 4A_4h^3 + 6A_6h^5 + 8A_8h^7 + \dots + 2nA_{2n}h^{2n-1} \quad (6)$$

则非球面变化率计算公式为:

$$sag_dif(h) = slop_asp(h) - slop_sp(h) \quad (7)$$

通过控制非球面度的符号来控制非球面拐点,即在半口径范围内,非球面度为正或者为负即可。文中研究的非球面技术如图 1 所示,图中横坐标为镜片半口径,纵坐标为非球面偏离量和非球面度变化量。

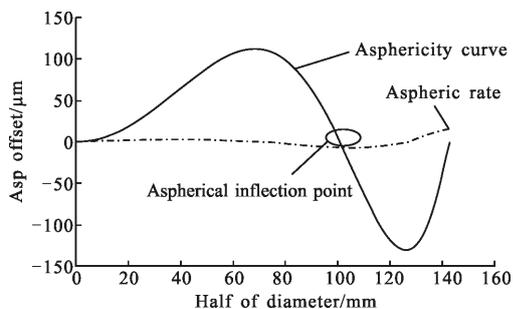


图 1 非球面度、非球面变化率和非球面拐点示例

Fig.1 Diagram of asphericity, aspheric rate and aspherical inflection point

2 耦合镜组的设计

照明系统中镜片数量最多的模块是耦合镜组,以耦合镜组为例对比全球面和非球面结构的设计结果,验证非球面控制技术的实用性。

2.1 耦合镜组全球面设计

NA1.35 照明系统耦合镜头全球面采用 14 片透镜,结构如图 2 所示,共轭距为 1 600 mm,最大通光

口径为 280 mm。



图 2 耦合镜头全球面设计结果

Fig.2 Design result of the spherical coupling lens

镜头畸变是光学透镜透视效果失真的总称,镜头畸变的形成受光线与光心的光轴距离的影响,距离越远,透镜造成的折射效果越明显。耦合镜头全球面畸变曲线如图 3 所示,最大畸变量为 0.07%。

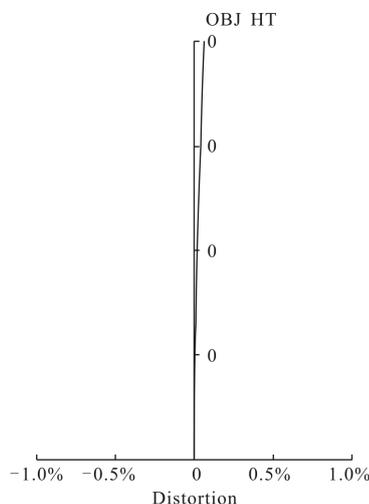


图 3 耦合镜头全球面畸变结果

Fig.3 Distortion of the spherical coupling lens

其设计要求和设计结果如表 1 所示。

表 1 耦合镜头全球面设计要求和结果

Tab.1 Design requirements and results of spherical coupling lenses

Parameters	Requirements	Results
Wavelength/mm	193.368	193.368
Magnification	1	1
Object space NA	0.337 5	0.337 5
Object height/mm	108	108
NA uniformity	<0.3%	0.15%
Telecentricity in image space/mrad	<0.2	0.05
Dispersion spot diameter/μm	<100	60
Distortion	<0.1%	0.06%
Working distance ahead/mm	>20	41.9
Working distance behind/mm	>100	107.3
Conjugate distance/mm	1 600	1 600
Most optical aperture/mm	≤300	280

2.2 耦合镜组非球面的设计

NA1.35 照明系统耦合镜头非球面采用 8 片式结构,6 片非球面均在凹面上,结构如图 4 所示,图中黑色线所示曲面均为非球面,光阑面位于镜 6 前表面上,选择靠近光阑附近的面作为非球面有利于轴上像差的校正,选择远离光阑的面作为非球面有利于轴外像差的校正,共轭距为 1 600 mm,最大通光口径为 260 mm。对于耦合镜组的非球面设计结果,镜片从左至右依次编号为 1~8,表面序号依次为 1~16,物面标号为 0,像面标号为 17。

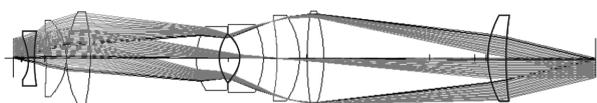
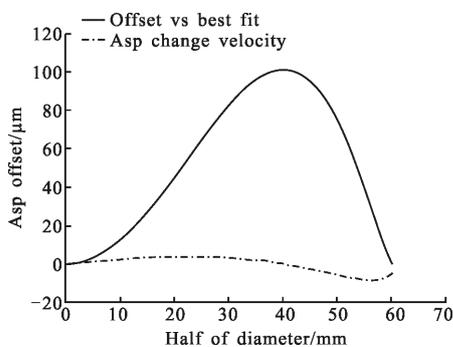


图 4 耦合镜头非全球面设计结果

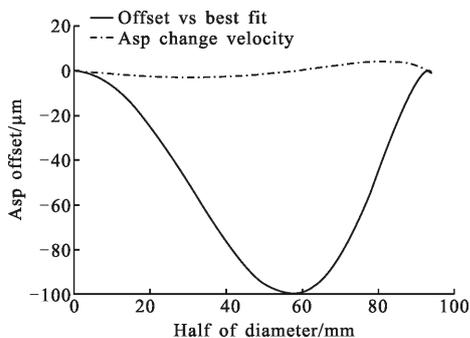
Fig.4 Design result of the aspherical coupling lens

系统最大非球面度为 0.1 mm,最大非球面变化率为 $8 \mu\text{m}/\text{mm}$,无拐点,且非球面均在凹面上,口径小于 260 mm,根据实际加工和检测能力,设计结果具有可加工性和可检测性。6 片非球面透镜的表面非球面度以及变化率曲线如图 5 所示。



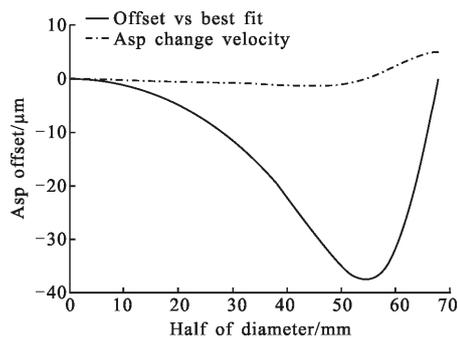
(a) 第 1 面非球面设计结果

(a) Design result of the first aspheric surface



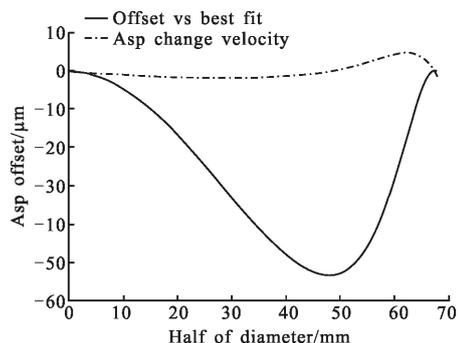
(b) 第 3 面非球面度设计结果

(b) Design result of the third aspheric surface



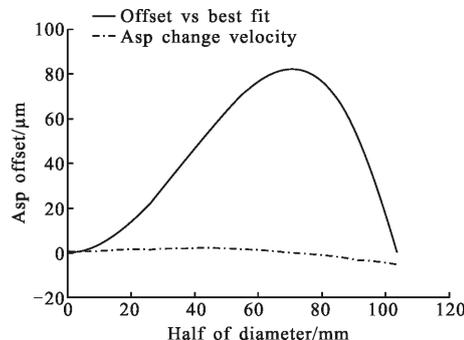
(c) 第 8 面非球面设计结果

(c) Design result of the eighth aspheric surface



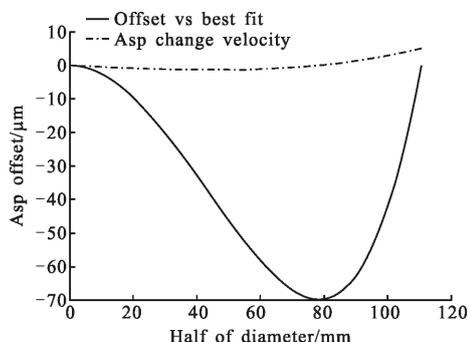
(d) 第 9 面非球面设计结果

(d) Design result of the ninth aspheric surface



(e) 第 11 面非球面设计结果

(e) Design result of the eleventh aspheric surface



(f) 第 16 面非球面设计结果

(f) Design result of the sixteenth aspheric surface

图 5 非球面设计结果

Fig.5 Design results of the aspheric surfaces

系统畸变曲线如图 6 所示,最大畸变量为 0.01%。

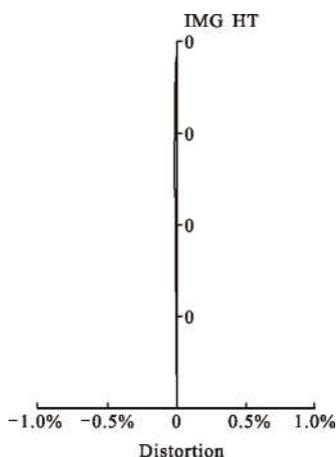


图 6 耦合镜头非球面畸变

Fig.6 Distortion of the aspherical coupling lenses

远心度是视场上各点主光线之间的最大夹角,单位为 mrad。耦合镜头非球面远心度达到 0.013 mrad,如图 7 所示。比较全球面耦合镜组的设计结果,非球面耦合镜组的像方远心度提高了近 3 倍。

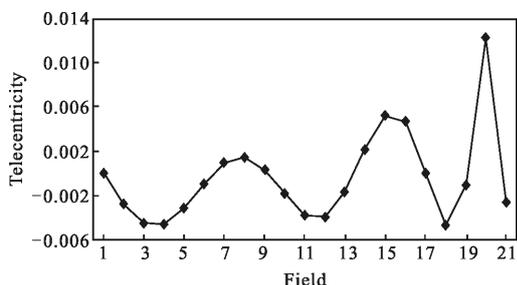


图 7 非球面耦合镜头的像方远心度

Fig.7 Image telecentricity degree of the aspherical coupling lenses

耦合镜头非球面设计要求和设计结果如表 2 所

表 2 耦合镜头非球面设计要求和设计结果
Tab.2 Design requirements and result of the aspherical coupling lenses

Parameters	Requirements	Results
Wavelength/mm	193.368	193.368
Magnification	1	1
Object space NA	0.337 5	0.337 5
Object height/mm	108	108
NA uniformity	<0.3%	0.13%
Telecentricity in image space/mrad	<0.2	0.013
Dispersion spot diameter/ μm	<100	30
Distortion	<0.1%	0.01%
Working distance ahead/mm	>20	43
Working distance behind/mm	>100	105
Conjugate distance/mm	1 600	1 600
Most optical aperture/mm	≤ 300	260

示,通过采用非球面对系统进行改进设计,与全球面结构的设计结果进行对比发现系统像质,NA 一致性、像方远心度、弥散斑直径和畸变均有提高。

3 照明系统均匀性仿真分析

采用 CODE V 软件对照明系统的均匀性进行仿真,将掩模面按 108 mm \times 22 mm、硅片面按 27 mm \times 5.5 mm 的区域分割为 270 \times 110 个小单元,累加每个小区内的光线能量,并将所有单元的能量进行归一化,形成掩模面光能的相对强度分布如图 8 所示。

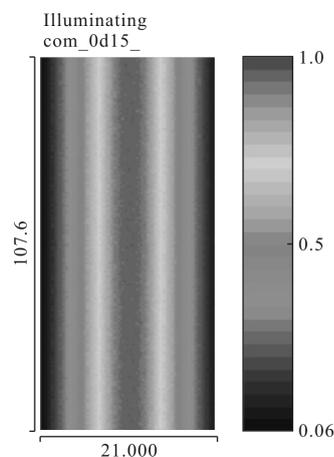


图 8 掩模面光能的相对强度分布

Fig.8 Relative intensity distribution of the light energy on the mask

掩模面照明性能仿真结果表明传统照明模式下,X 向的积分照明光强均匀性优于 99.5%,均匀性很好。

4 结论

文中以 NA1.35 浸没式光刻系统中耦合镜组为例,设计并对比了采用全球面和非球面的耦合镜组的优化设计结果,可以看出非球面在减少系统尺寸和镜片数量的基础上,也可以很好地保证系统成像质量,NA 一致性、像方远心度、弥散斑直径和畸变等。从优化设计结果可以看出,非球面结构具有显著优势和良好的实用性。此外,采用 CODE V 软件对浸没式光刻照明系统的均匀性进行了模拟仿真,结果表明采用非球面技术优化设计的耦合镜组使照明系统在传统照明模式下,X 向的积分照明光强均匀性均优于 99.5%,验证了该非球面技术具有良好的可加工性和可检测性。同时,将该非球面控制技术运

用于照明系统中的扩束镜组、相干因子调节镜组、复眼会聚镜组以及光刻投影物镜,都会大大提高整个光刻曝光系统的能量利用率,缩小透镜通光口径,改善成像质量,对于推进整个光刻技术向前发展有着决定性的作用。

参考文献:

- [1] Hu Dejin. Precision grinding and adaptive control method for hard and brittle aspheric optical mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(7): 0722004. (in Chinese)
胡德金. 硬脆非球面光学镜精密磨削与自适应控制方法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0722004.
- [2] Pang Zhihai, Fan Xuewu, Ma Zhen, et al. Free-form optical elements corrected aberrations of optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522001. (in Chinese)
庞志海, 樊学武, 马臻, 等. 自由曲面校正光学系统像差的研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522001.
- [3] Li Xuyu, Wei Chaoyang, Xu Wendong, et al. Tool influence function in aspheric polishing under dynamic pressure distribution [J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24 (12): 3061–3067. (in Chinese)
李徐钰, 魏朝阳, 徐文东, 等. 随动压力分布下的非球面抛光去除函数[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(12): 3061–3067.
- [4] Fan Xiaoming, Luo Cijin, Xu Xueke, et al. Compensation of astigmatism in coordinate measurement for optical aspheric elements[J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24(12): 3012–3019. (in Chinese)
范晓明, 罗词金, 徐学科, 等. 光学非球面三坐标测量中的像散补偿[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(12): 3012–3019.
- [5] Fan Zengming, Li Zhou, Qian Lixun. Aspherical lens laser beam shaping system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 353–357. (in Chinese)
范增明, 李卓, 钱丽勋. 非球面透镜组激光光束整形系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 353–357.
- [6] Wang Honghao, Ming Ming, Lv Tianyu, et al. Testing methods of high-gradient conformal aspheric surfaces based on annular sub-aperture stitching [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0417001. (in Chinese)
王洪浩, 明名, 吕天宇, 等. 高陡度保形光学非球面环形子孔径检测方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0417001.
- [7] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Liao Sheng, et al. Infrared dual band athermal optical system with common aperture [J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24(2): 268–277. (in Chinese)
白瑜, 廖志远, 廖胜, 等. 共孔径消热差红外双波段光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(2): 268–277.
- [8] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Li Hua, et al. Design and analyse on catadioptric MWIR athermal imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 407–412. (in Chinese)
白瑜, 廖志远, 李华, 等. 折反射中波红外探测无热化成像系统设计分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 407–412.
- [9] Forbes G W. Robust, efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres[J]. *Opt Express*, 2010, 18 (19): 19700–19712.
- [10] Zhang L, Liu D, Shi T, et al. Practical and accurate method for aspheric misalignment aberrations calibration in non-nullinterferometric testing [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(35): 8501–8511.
- [11] Michael M Pfeffer, Hochschule. Aspheric optics-from design to manufacturing and aspheric metrology [J]. *Adv Opt Techn*, 2016, 5(3): 199–200.
- [12] Qin Hua, Feng Dongtai, Ge Shuoshuo. Optical design of build-up aspherical solar concentrating mirror [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 844–854. (in Chinese)
秦华, 冯东太, 葛硕硕. 组合非球面太阳能聚光镜的光学设计[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 844–854.