

A Finite Element Analysis Method of Low Frequency Surface Figure Parameters of Coating Components

Shuying Shao¹, Yingjie Chai^{1,2}, Hu Wang^{1,2}, Meng Guo^{1,2}, Kui Yi¹

¹Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: shaoshuying@siom.ac.cn

Received: May 13th, 2016; accepted: May 27th, 2016; published: May 30th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The deformation caused by substrate coating is simulated by using the finite element method; then simulation results input Metropro 8.3.5 surface graph processing software through the data conversion; at last we obtain the low frequency surface parameter variation. The simulated results and measured results are compared. The comparison shows that the simulated results and measured results are very close. The surface shape parameters variation index of the complex shape, and large diameter coating substrate can be forecast through this method, and it is possible to control the surface shape active quantitative of coating components.

Keywords

Thin Film, Low Frequency Wavefront Parameters, Finite Element Simulation, Large Aperture Substrate

镀膜元件低频面形参数的有限元模拟及分析方法

邵淑英¹, 柴英杰^{1,2}, 王虎^{1,2}, 郭猛^{1,2}, 易葵¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海

²中国科学院大学, 北京
Email: shaoshuying@siom.ac.cn

收稿日期: 2016年5月13日; 录用日期: 2016年5月27日; 录用日期: 2016年5月30日

摘要

利用有限元法对基片镀膜引起的变形量进行了模拟, 通过数据转换将模拟结果输入Metropro 8.3.5面形处理软件, 得到了低频面形参数变化量。对比模拟结果与实测结果, 发现两者非常接近。利用该方法实现了形状复杂、口径较大镀膜基片面形参数变化量指标的预估, 使得镀膜元件面形主动量化控制成为可能。

关键词

薄膜, 低频面形参数, 有限元模拟, 大口径基片

1. 引言

镀膜光学元件在高功率激光系统、空间光学、天文光学等领域得到越来越广泛的应用[1] [2], 对元件的面形指标不再局限于对峰谷值的要求, 而是针对不同空间波长, 提出了更加细化的面形参数指标[3]。同时有镀膜要求基片的形状不再是规整的圆形或者方形, 而是根据使用功能及装配等要求变得更加复杂, 材料各异。要对其镀膜后面形参数进行精确控制, 利用反复实验的工艺方法, 无疑成本太高, 因此如何对镀膜后元件的面形变化情况, 及面形参数的变化量进行准确的预先模拟计算, 成为使用方及镀膜人员迫切关注的问题。本文利用有限元方法, 根据相同镀膜条件下基片的受力情况, 拓展至形状复杂镀膜基片, 对其镀膜后的面形参数变化情况进行了模拟计算, 经与实际镀膜结果对比, 非常接近。这为形状复杂元件的面形参数预估提供了较为可靠的参考。

根据光学元件的口径、自适应光学校正技术和空间滤波器的设计原则美国 LLNL 在“点火装置”(NIF)研制过程, 按照空间频段的不同将光学元件的制造误差分为3段[4]-[10]: 低频段, 空间波长 $\lambda > 33 \text{ mm}$, 相当于空间域的表面面形, 用波前畸变 PV 值及波前梯度 RMS 值进行评价; 中频段, 空间波长 $33 \text{ mm} > \lambda > 0.12 \text{ mm}$, 称为波纹差, 用功率谱密度(PSD)进行评价; 高频段, 空间波长 $\lambda < 0.12 \text{ mm}$, 用表面粗糙度进行评价。在实际的膜层镀制过程中, 由于基底整体形变会对低频面形参数产生显著影响, 而中高频面形参数与基底加工水平密切相关, 因此镀膜过程主要是对元件低频面形参数的控制。本文利用有限元法对基片镀膜后的低频面形参数进行了模拟, 提供了一种对镀膜元件低频面形参数的预判方法。

2. 有限元分析的力学原理

理论研究、科学实验以及计算分析是人们进行科学研究和解决实际工程问题的重要手段, 随着计算机技术及数值分析方法的发展, 以有限元方法为代表的数值计算技术得到越来越广泛的应用。弹性力学的基本量和基本方程是进行有限元分析的重要理论基础[11]。一些列出了在进行有限元模拟过程中用到的力学原理及计算方法。

2.1. 弹性力学基本量

弹性体在载荷的作用下, 体内任一点的应力状态可以由6个应力分量来表示:

$$\sigma = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx}]^T$$

其中 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为正应力; $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为剪应力, 弹性体在外载荷的作用下, 还将产生位移和形变, 弹性体内任一点的位移可由沿直角坐标方向的三个位移分量来表示:

$$u = [u \ v \ w]^T$$

弹性体内的任一点的应变可以由 6 个应变分量来表示:

$$\varepsilon = [\varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{zx} \ \gamma_{xy} \ \gamma_{yz} \ \gamma_{zx}]^T$$

其中 $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ 为正应变, $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 为剪应变。

2.2. 弹性力学基本方程

对于三维问题, 弹性力学基本方程可以写成如下形式:

1) 平衡方程

弹性体 v 域内任一点沿坐标轴 xyz 方向的平衡方程的矩阵形式为:

$$A\sigma + \bar{f} = 0$$

其中 A 为微分算子, σ 为应力列阵, \bar{f} 为体积力向量, $\bar{f} = [\bar{f}_x \ \bar{f}_y \ \bar{f}_z]^T$ 。

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix}$$

2) 几何方程——应变 - 位移关系

在微小位移和微小变形的情况下, 略去位移导数的高次幂, 则应变向量和位移向量间的几何关系矩阵形式为:

$$\varepsilon = Lu$$

其中 ε 为应变列阵, L 为微分算子, $L = AT$ 万, u 为位移向量。

3) 物理方程——应力 - 应变关系

对于各向同性的线弹性材料, 应力通过应变的表达式用矩阵形式表示为:

$$\sigma = D\varepsilon$$

$$\text{其中 } D = \frac{E(1-\nu)}{1+\nu(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

D 称为弹性矩阵, 其完全取决于弹性体材料的弹性模量 E 和泊松比 ν 。

4) 力的边界条件

弹性体 V 的全部边界为 S 。一部分边界上已知外力 $\bar{T}_x, \bar{T}_y, \bar{T}_z$, 称为力的边界条件, 这部分边界用 S_σ 表示; 另一部分边界上已知位移而称为几何边界条件或位移边界条件; 另一部分边界上已知位移 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 称为几何边界条件或者位移边界条件, 这部分边界用 S_u 表示。这两部分边界构成弹性体的全部边界, 即:

$$S_\sigma + S_u = S$$

弹性体在边界上单位面积的内力为 T_x, T_y, T_z , 在边界 S_σ 上已知弹性体单位面积上的面积力为 $\bar{T}_x, \bar{T}_y, \bar{T}_z$, 根据力的平衡有:

$$T = \bar{T}$$

5) 几何边界条件

在 S_u 上弹性体的位移已知为 $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$, 则应有:

$$u = \bar{u}$$

3. 镀膜元件面形参数的有限元模拟与实验验证

根据基片受力状态及边界条件, 利用 COMSOL 软件对其变形情况进行模拟, 将模拟结果进行数据导出, 经过相应的数据转换之后, 导入相关处理软件比如 Metropro 软件等或者其它软件对数据进行分析, 得出因镀膜过程形变引起的 PV、RMS、GRMS 等参数的变化量。对实际样品进行镀膜实验, 根据相应面形参数检测结果, 对模拟结果进行验证, 根据验证结果, 推算值大口径元件, 对其面形参数变化量进行预估。

3.1. $\Phi 149$ mm 微晶镀膜元件低频面形参数的 COMSOL 软件模拟

$\Phi 149$ mm 微晶待镀膜元件形状非常复杂, 加工成本高, 为了在现有镀膜条件下, 对元件镀膜后面形进行预估, 提高镀膜成功率, 利用 COMSOL Multiphysics 5.0 软件对元件镀膜后的面形进行模拟。薄膜应力的大小根据相同镀膜条件下较小尺寸元件的受力情况等效而来。图 1 给出了所选用的三维模型及网格划分情况, 采用周边约束方式, 载荷为等效面载荷及重力载荷, 由已有小口径镀膜元件的应力推算得出。图 2 给出了 COMSOL 软件模拟结果及数据经转换后输入 Metropro 软件后读出的面形参数结果。因为在模拟过程中, 元件初始面形为理想平面, 变形的结果与镀膜前后元件的面形变化量相对应。

表 1 给出了模拟结果与实验结果的对比。可以看出模拟结果与实验结果非常接近, PV 值相差仅 0.03 λ , 说明经 COMSOL 软件模拟后的结果, 与实际的镀膜结果相符合, 可以确认方法的可行性。用该方法实现形状复杂, 尺寸较大元件的面形参数模拟成为可能。

3.2. $\Phi 745$ mm 元件低频面形参数的有限元模拟

对于与 $\Phi 149$ mm 元件形状相同尺寸为 $\Phi 745$ mm 的元件, 因为之前没有制备过相同材料相同口径的镀膜元件, 对其镀膜后面形参数变化情况没有任何参考, 为了确定在目前镀膜工艺下, 元件镀膜后的面形变化量及低频面形参数的变化范围, 需要对镀膜后面形指标进行预估, 以便确认目前工艺的安全性。

图 3 给出了大口径元件的模拟过程及模拟结果, 表 2 列出了最终的面形参数模拟结果, 以此模拟结果作为参考, 就可以确定基片镀膜后低频面形参数的控制范围, 为客户提供参考。

4. 结论

针对口径较大、形状复杂的镀膜元件, 利用有限元模拟及数据转换的方法, 提出了一种低频面形参

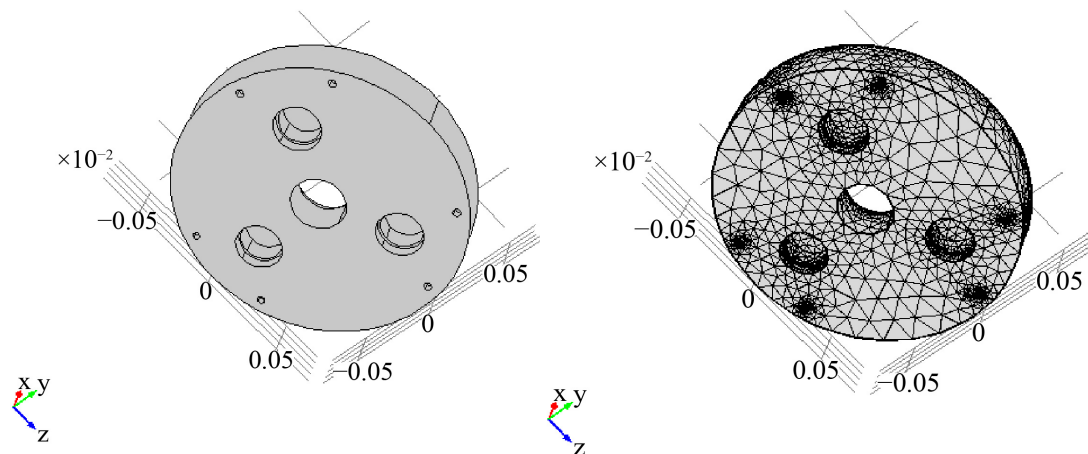


Figure 1. $\Phi 149$ mm substrate model figure parameters 3D model and meshing
 图 1. $\Phi 149$ mm 基底的三维模型、网格划分

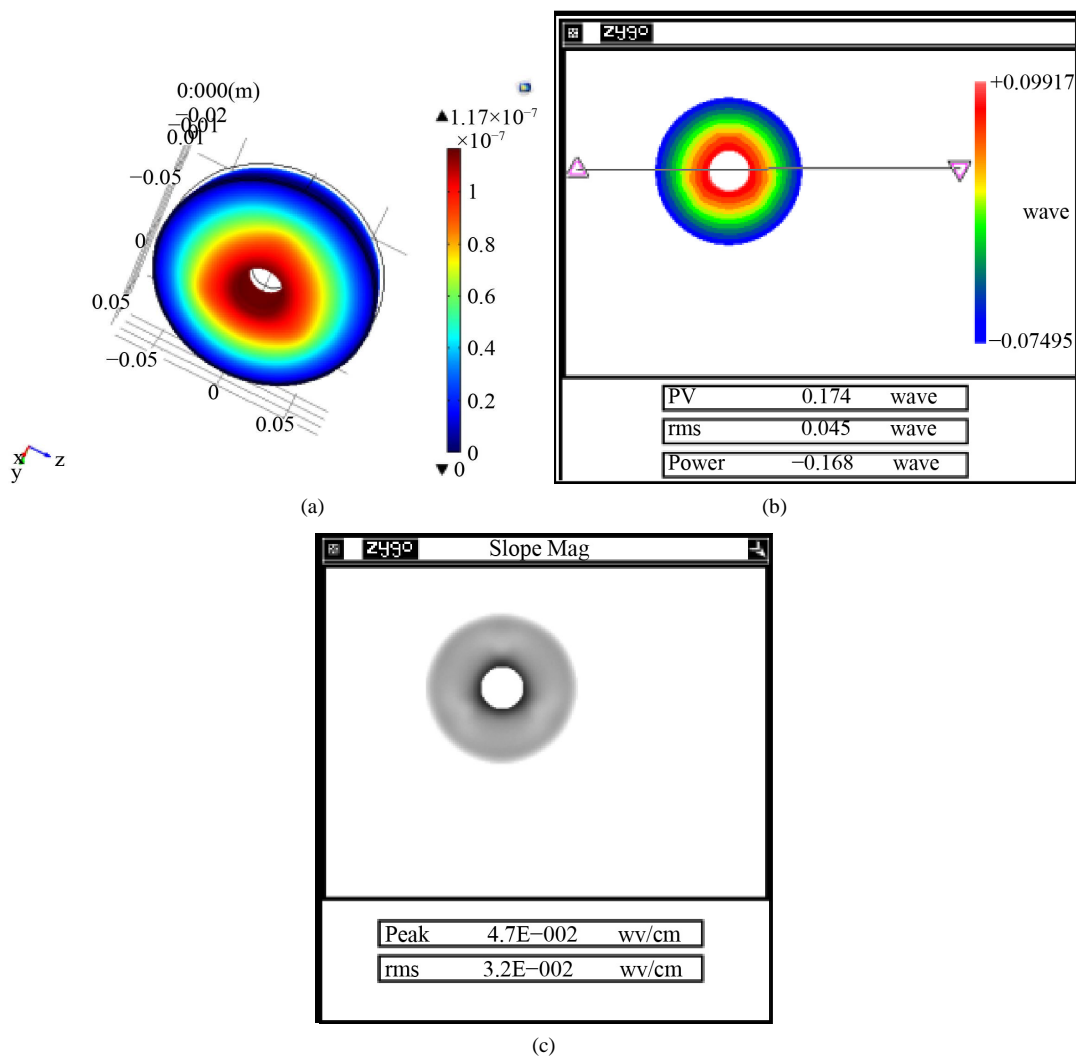


Figure 2. The simulation results and the low-frequency surface shape parameters results from Metropro software after data input it
 图 2. 模拟结果及数据输入 Metropro 软件后低频面形参数结果

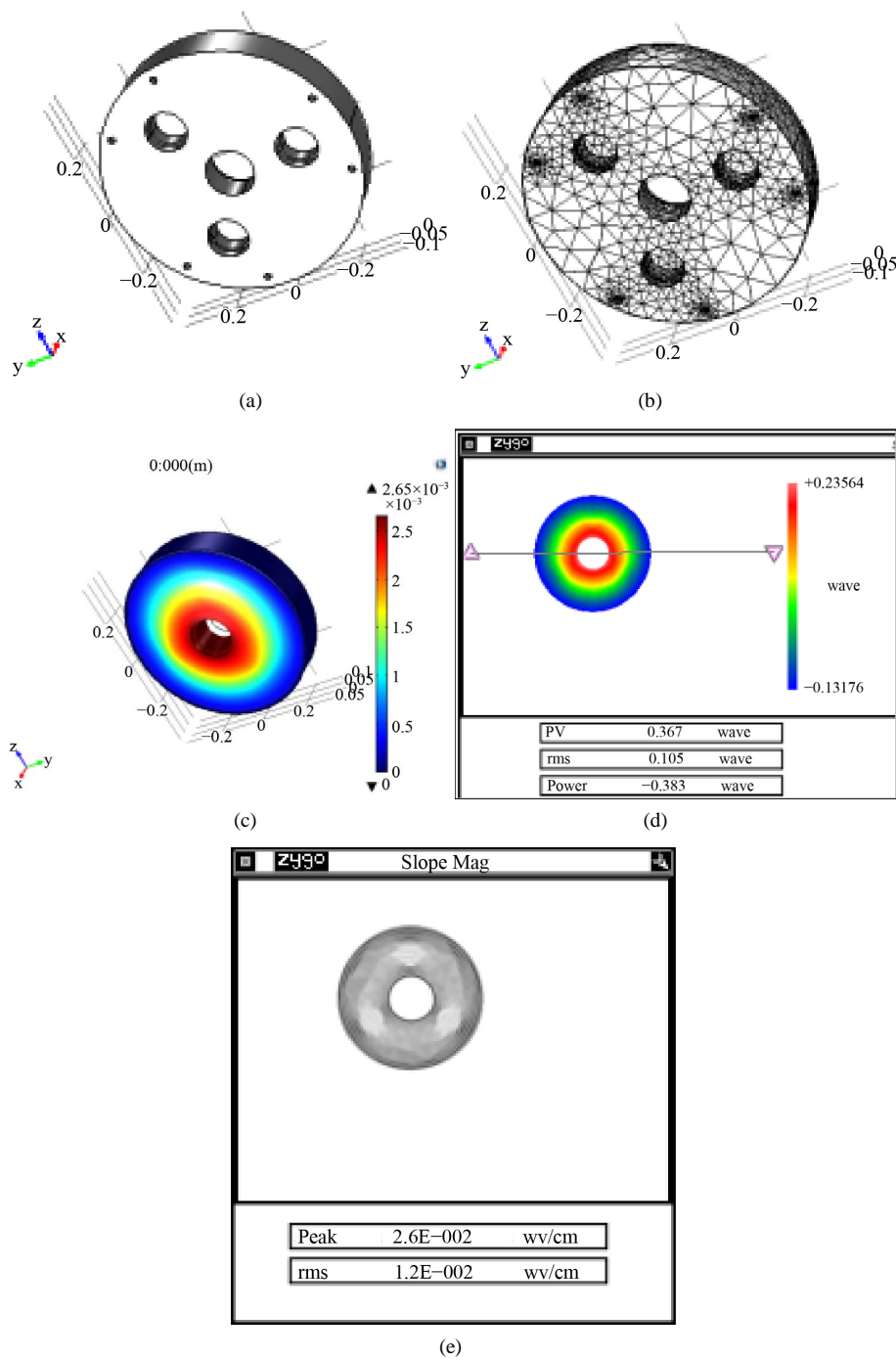


Figure 3. $\Phi 745$ mm substrate model figure parameters. (a) 3D model; (b) Meshing; (c) Simulated results; (d) ZYGO results; (e) GRMS

图 3. $\Phi 745$ mm 有限元模拟面形参数。(a) 三维模型；(b) 网格划分；(c) 模拟结果；(d) ZYGO 软件结果；(e) GRMS

Table 1. The comparison between the simulated results and actual results of $\Phi 149$ mm substrate

表 1. $\Phi 149$ mm 元件模拟结果与实际镀膜结果对比

	PV	RMS	GRMS
Variation before and after coating ($\lambda = 633$ nm)	0.186λ	0.032λ	0.023λ
Simulated results ($\lambda = 633$ nm)	0.156λ	0.044λ	0.032λ

Table 2. Simulated results of surface figure parameters
表 2. 面形参数模拟结果

	PV	RMS	GRMS
Simulated results ($\lambda = 633 \text{ nm}$)	0.32λ	0.085λ	0.012λ

数的模拟方法, 利用此种方法可以实现对镀膜元件低频面形参数的模拟。根据实际镀膜结果与模拟结果的对比, 两者之间非常接近。这一过程的实现, 可以对同一工艺下面形控制精度及控制范围进行定型, 同时以模拟结果为参考可以实现工艺参数的定量调整, 提高工艺控制精度。

参考文献 (References)

- [1] 朱硕. 大口径光学平面镜面形检测技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [2] 伦宝利. 大口径天文光学望远镜主镜镀膜的研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [3] 张国伟. 高功率激光装置光学元件 PSD1 检测方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [4] Wolfe, C.R. and Lawson, J.K. (1997) The Measurement and Analysis of Wavefront Structure from Large Aperture ICF Optics. *Proceedings of SPIE*, **2633**, 361-383. <http://dx.doi.org/10.1117/12.228288>
- [5] Akaoka, K., Maruyama, Y. and Arisawa, T. (1997) Development of Wavefront Control System Using Deformable Mirror for Solid State Lasers for Solid State Lasers. *Proceedings of SPIE*, **2986**.
- [6] Wolfe, C.R., Lawson, J.K., Aikens, D.M. and English, R.E. (1995) A Database of Wavefront Measurements for Laser System Modeling, Optical Component Development and Fabrication. *Proceedings of SPIE*, **2545**, 229. <http://dx.doi.org/10.1117/12.212651>
- [7] Hendrix, J.L., Schweyen, J. and Rowe, J. (1999) Ghost Analysis Visualization Techniques for Complex Systems: Examples from the NIF Final Optics Assembly. *Proceedings of SPIE*, **3492**, 306-320. <http://dx.doi.org/10.1117/12.354142>
- [8] Wang, D.Y., English Jr., R.E. and Aikens, D.M. (1999) Implementation of ISO 10110 Optics Drawing Standards. *Proceedings of SPIE*, **3782**, 502-508. <http://dx.doi.org/10.1117/12.369230>
- [9] Wegner, P., Auerbach, J., Biesiada, T., Dixit, S., Lawson, J., Menapace, J., Parham, T., Swift, D., Whitman, P. and Williams, W. (2004) NIF Final Optics System: Frequency Conversion and Beam Conditioning. *Proceedings of SPIE*, **5341**, 180-189. <http://dx.doi.org/10.1117/12.538481>
- [10] Aikens, D.M. (1995) The Origin and Evolution of the Optics Specifications for the National Ignition Facility. *Proceedings of SPIE*, **2536**, 1-12. <http://dx.doi.org/10.1117/12.218410>
- [11] Liu, Z.D. (2011) The Research of Calibration and Testing Techniques of 600 mm Near-Infrared Phase-Shifting Fizeau Interferometer. Ph.D. Dissertation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing.