

用于非球面检验的激光直写高精度计算全息图制作

赵龙波^{1,2} 张志宇^{1*} 朱德燕^{1,2} 王延超^{1,2} 郑立功¹ 张学军¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现高精度非球面的面形误差检测,对激光直写计算全息图(CGH)的关键技术进行研究。以获得最小线宽偏差为目的,通过基础工艺实验,探究离焦量对光刻胶上线宽的影响;研究湿法刻蚀过程对不同线宽引入的展宽规律;分析线宽误差与位置误差关系,得到CGH不同周期位置误差引入的波前误差。根据实验结果,制作最小线宽 $1.8\ \mu\text{m}$,直径80 mm的振幅型CGH。检测结果表明,波前误差均方根值为 0.011λ ,达到 $\lambda/100$ 量级,可用于高精度非球面的检测。

关键词 全息;衍射光学元件制作;线宽;非球面检验

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.110902

Fabrication of High Precision Computer Generated Hologram for Aspheric Surface Testing by Laser-Direct Writing

Zhao Longbo^{1,2} Zhang Zhiyu¹ Zhu Deyan^{1,2} Wang Yanchao^{1,2}

Zheng Ligong¹ Zhang Xuejun¹

¹Key Laboratory of Optical System Advance Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to realize high-precision testing of aspherical surface, the key technology for fabricating computer generated hologram (CGH) by laser-direct writing (DWL) is studied in this paper. To obtain the minimum line-width deviation, the influences of defocus and the wet-etching processes on the line-width are firstly investigated. The position errors under different line-widths are obtained by analyzing the relationship of line-width error and the position error. According to the above-obtained results, a CGH with diameter of 80 mm and the minimum line-width of $1.8\ \mu\text{m}$ is successfully fabricated. Testing results show that the wavefront error is only 0.011λ , achieving the $\lambda/100$ level. The fabricated CGH is expected to be used in the high-precision testing of aspherical surfaces.

Key words holography; fabrication of diffractive optical elements; line-width; aspheric surface testing

OCIS codes 090.1760; 220.4840; 220.4610; 230.4000

1 引言

利用计算全息图(CGH)检测非球面的面形误差是一种高精度、低成本的光学补偿检验方法^[1]。和传统 null lens 补偿检验相比,该方法具有光学设计残差小、加工成本低、加工周期短、检测精度高等优点^[2],许多

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2014-06-12; 网络出版日期: 2014-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(51305422)、国家973计划(2011CB013200)

作者简介: 赵龙波(1989—),男,硕士研究生,主要从事衍射光学元件加工与应用方面的研究。

E-mail: zhaolb.cc@foxmail.com

导师简介: 张学军(1968—),男,博士,研究员,主要从事先进光学制造和空间光学系统等方面的研究。

E-mail: zxj@ciomp.ac.cn

*通信联系人。E-mail: zhangzhiyu@ciomp.ac.cn

大型望远镜的成功制作与运行都得益于高精度的CGH补偿检验^[3-4]。CGH属于大口径衍射光学元件,条纹密集且线宽变化范围广。从加工工艺上分,CGH分为振幅型和相位型两种:振幅型CGH是把设计图案加工在玻璃基板表面的Cr镀层上,而相位型CGH是通过复杂工艺将图案加工到玻璃基板表面。相位型CGH一级衍射条纹的衍射效率是振幅型CGH的四倍,因此在检测低反射率表面时具有优势,但由于制作工艺复杂,检测精度难以保证。振幅型CGH制作工艺相对简单,且制作误差敏感度低,检测精度容易保证,广泛应用于高精度非球面的光学检验。

目前主流的CGH制作方法有激光直写和电子束直写。电子束直写具有很高的分辨率^[5],但加工效率低下。激光直写是通过计算机控制直写焦斑对光刻胶进行扫描曝光,和电子束直写相比,具有成本低、速度快、效率高等优点,是大口径CGH的主要加工手段。在激光直写CGH研究方面,Salgueiro等^[6]对直写焦斑进行了严谨的数学描述,研究了离焦量、激光器能量等对线宽的影响;美国亚利桑那大学Zhou等^[7-8]从理论上分析了CGH的制作精度对波前误差的影响,为制作高精度的CGH提供了理论依据,Cai等^[9]分析了CGH编码误差波前误差的影响,为进一步提高CGH制作精度提供了新思路,考虑到CGH设计的复杂性,很难运用到实际加工;俄罗斯科学院Cherkashin等^[10]基于激光直写与热化学刻蚀技术,制作了检测精度达到 $\lambda/50$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)的计算全息图,但没有对线宽的影响因素进行深入研究,而且由于技术本身的缺陷,很难进一步提高CGH的检测精度;德国斯图加特大学Peterhänsel等^[11]用严格的衍射理论分析CGH波前精度对制作误差的敏感性,弥补了标量衍射理论的不足,为周期在亚微米量级的CGH设计与加工提供了理论依据。

本文分析了制作误差对CGH检测精度的影响,并实验验证了提高振幅型CGH检测精度的工艺方法。实际加工线宽与设计线宽的偏差是考量CGH加工质量最重要的指标,加工引入的线宽偏差越小,CGH制作精度越高。同时,CGH的最小设计线宽越小,加工难度越大。以获得最小线宽偏差为目的,通过基础工艺实验,研究离焦量对光刻胶上槽宽的影响以及湿法刻蚀对不同线宽引入的展宽规律,最终得到CGH不同周期的位置误差曲线。制作了直径80 mm的振幅型CGH,在最小线宽1.8 μm 的设计指标下,获得了 $\lambda/100$ 的检测精度。

2 CGH制作的工艺

2.1 工艺流程与误差分析

采用德国Heidelberg公司生产的DWL4000激光直写系统。该系统采用405 nm半导体激光器,可加工最大幅面达400 mm \times 400 mm,工作台定位精度为100 nm。DWL4000采用如图1所示的直角坐标扫描曝光方式,利用计算机控制工作台进行精确扫描,直接在光刻胶上曝光写入所设计的图案,具有很高的加工精度和加工效率。

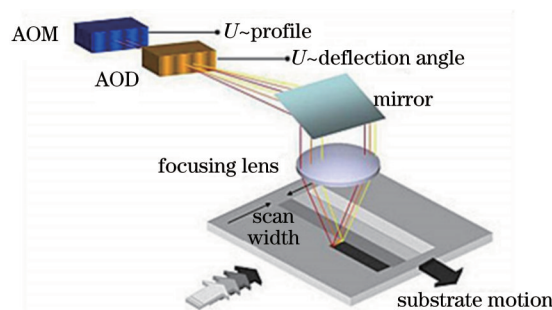


图1 DWL4000激光直写系统工作示意图

Fig.1 Diagram of DWL4000 writing strategy

振幅型CGH的加工工艺流程如图2所示,具体包括:1)在等光程熔石英基片(两面的平整度达到 $\lambda/20$,角度偏差 $5'$ 以内)的一个面上镀Cr,厚度为200 nm,在Cr层上涂光刻胶,厚度为1 μm ,得到待加工元件;2)用激光直写系统曝光,而后显影、烘焙,将图案加工到光刻胶层上;3)对Cr层进行湿法刻蚀,除去胶层,清洗基片,将图案转移到Cr层上,得到用于非球面检验的振幅型CGH。

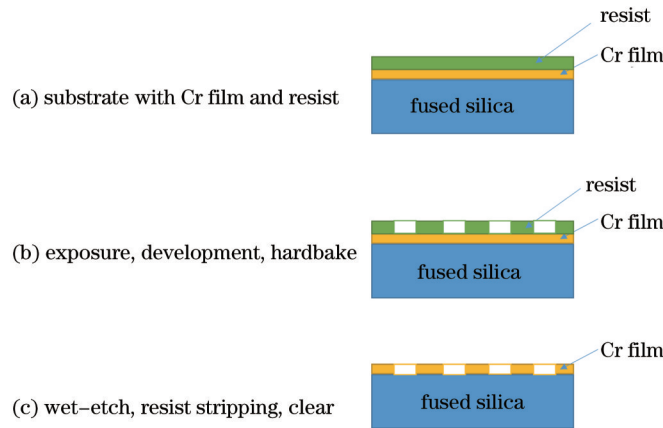


图2 振幅型CGH制作流程

Fig.2 Production flow chart of amplitude CGH

CGH的制作误差主要包括基板误差、刻蚀深度误差、占空比误差、位置误差,制作误差对波前误差的影响如表1所示。

表1 CGH制作误差对波前精度的影响

Table 1 Effect of CGH fabrication error on wavefront precision

Source of errors	Amplitude CGH	Phase CGH
CGH substrate error	Yes	Yes
Etching depth error	No	Yes
Duty-cycle error	No	Yes
Amplitudes error	No	Yes
Pattern distortion	Yes	Yes

影响振幅型CGH制作误差的因素包括基板误差和位置误差。基板误差可测,并可在使用时去除掉其对波前的影响,因而位置误差是影响振幅型CGH检测精度的最主要因素^[7]。由位置误差引入的波前误差可以表示为

$$\Delta W = -m\lambda \frac{\varepsilon}{S}, \quad (1)$$

式中 m 为衍射级次, λ 为干涉仪波长, S 为周期, ε 为该周期的位置误差,对 $20\ \mu\text{m}$ 周期而言,可粗略估算出 $200\ \text{nm}$ 的位置误差引入的波前误差为 $\lambda/100$ 。

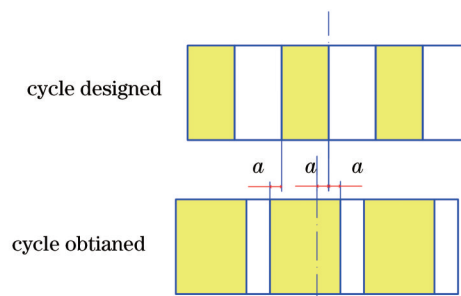


图3 线宽偏差导致的位置误差

Fig.3 Position error caused by width error

线宽偏差是导致位置误差的原因之一。如图3所示,设计的CGH一个周期包括占空比为50%的沟槽,沟槽线宽偏差假设为 $2a$ 。 a 若为正数,这个周期的位置就会向CGH中心平移 a 。即线宽偏差会导致CGH周期的位置误差,并且数值上前者是后者的两倍。

2.2 工艺实验方案

为掌握工艺参数对不同线宽偏差的影响,设计了变化范围在 $1\sim 30\ \mu\text{m}$ 的多线宽实验版型,如图4所示。对不同设计线宽,采用原子力显微镜(AFM)测量了离焦量对光刻胶上线条轮廓的影响,以及不同刻蚀

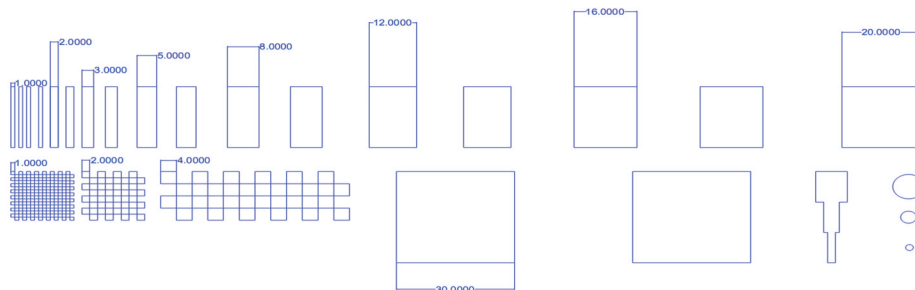


图4 实验版型

Fig.4 Experimental figure

时间引入的展宽,最终得到线宽偏差和位置误差。

3 实验结果

3.1 离焦量对光刻胶上线宽的影响

线宽可用三个参数表征:顶部线宽、中间线宽、底部线宽,如图5所示。传统光刻工艺的线宽一般用中间线宽表示,然而在图形转移过程中起决定作用的是光刻胶上沟槽底部线宽,影响振幅型CGH波前转换的也是Cr层上的沟槽的底部线宽。所提到的线宽在不加说明的情况下,均指沟槽的底部线宽。

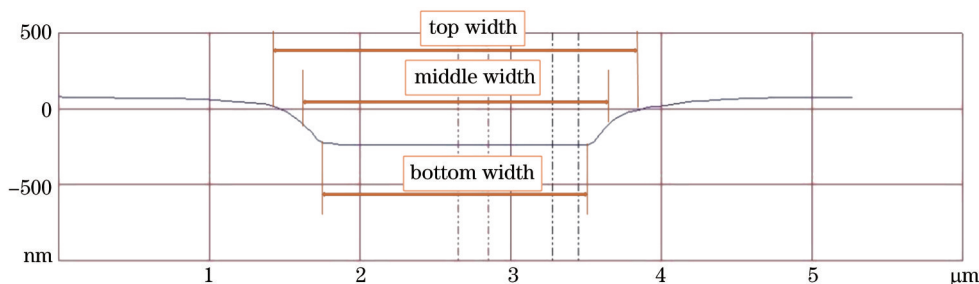


图5 AFM下光刻胶上2 μm线条的轮廓(比例为1:1)

Fig.5 Outline of 2 μm line by AFM (proportion is 1:1)

根据标量衍射理论^[12],一定量的离焦会使衍射焦平面上的直写焦斑变大,焦斑边缘光强下降速度变缓,导致线条变宽,侧壁角减小。现有文献虽在这方面进行了仿真研究^[13-14],但都以光刻线宽偏差的10%作为参考。10 μm的线条,认为误差在±1 μm时就不能制作高精度的CGH。为此做了大量的工艺实验,研究离焦量对光刻胶上线宽的影响。图6是离焦量对光刻胶上3 μm线条轮廓的影响曲线图,可知侧壁角达到最大的情况下,加工线宽最小,可以认为对焦成功^[14]。最小的焦斑在光刻胶表面,但是线宽却并没有达到设计线宽,而负离焦量比较大(-12)时,光刻胶上的线宽接近设计线宽。并且统计了在这个离焦量下,其他线条的线宽,如图7所示。结果证明,所有线宽的线条都符合图6中的线宽形成规律。为后面的图案“转移”到Cr层奠定

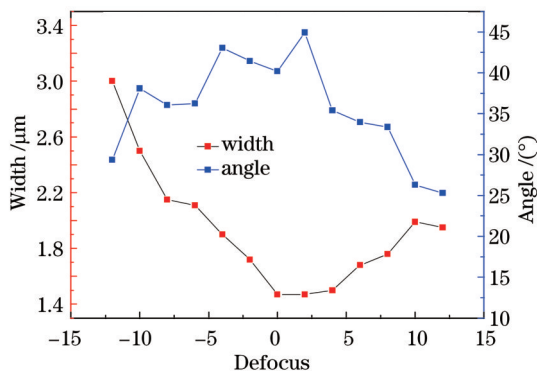


图6 光刻胶上3 μm线条轮廓随离焦量的变化
Fig.6 Outline of 3 μm line changed by defocus

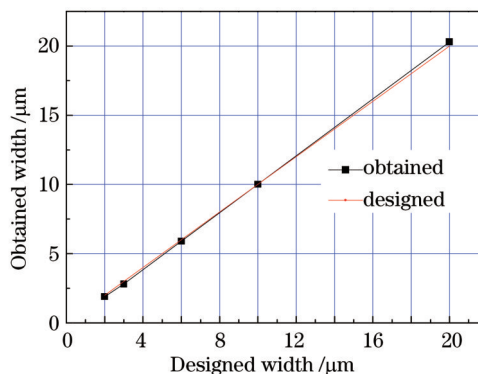


图7 负离焦量(-12)下光刻胶上线宽与设计线宽的对比
Fig.7 Contrast of width obtained on resist and width designed under the defocus of -12

了基础。

3.2 刻蚀引入的展宽

CGH图案向Cr层的转移是各向同性的湿法刻蚀过程,不可避免地要引入线宽偏差,还有可能出现钻蚀现象。因此需要研究线宽在这个“转移”过程中出现的变化。选择对焦成功的曝光参数进行工艺实验,先测量了光刻胶上不同线宽,得到不同线宽在光刻胶上的线宽偏差曲线规律,如图8所示。

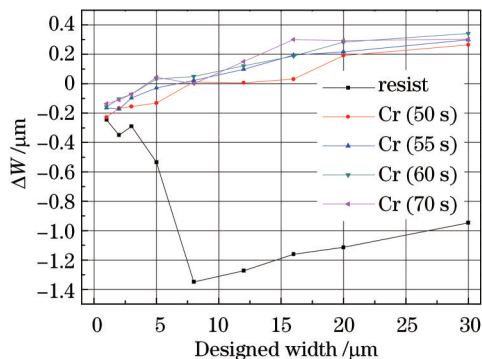


图8 胶层与Cr层上获得线宽与设计线宽的偏差

Fig.8 Width error between stripe on resist, stripe on Cr and stripe designed

3.2.1 刻蚀时间

为了得到合理的刻蚀时间,还以相同的曝光参数加工了若干陪片,以刻蚀时间作为变量,测量Cr层上沟槽的线宽。图8的横坐标是设计线宽,纵坐标是测得的Cr层线宽与光刻胶层线宽相比较设计的线宽偏差,正数表示获得线宽大于设计线宽,负数表示获得线宽小于设计线宽。可以看到:1)光刻胶上的线宽偏差在一定范围内近似线性增加,而后稳定在一定范围内;2)较大线宽位置的Cr层容易被刻蚀掉,线条较细的位置则需要较长的刻蚀时间,这是由于液体表面张力作用下,腐蚀亚微米量级的条纹时侧壁难以充分接触刻蚀液。综合考虑,将刻蚀时间定为55 s。

3.2.2 展宽曲线

将Cr层上的线宽偏差,减去相应光刻胶上的线宽偏差,得到湿法刻蚀引入的展宽曲线。如图9中B曲线所示,刻蚀引入的展宽同样在一定范围内增加,而后趋于稳定,最终Cr层上的线宽偏差得到了保证。最大的线宽偏差出现在30 μm 线条处,为303 nm。

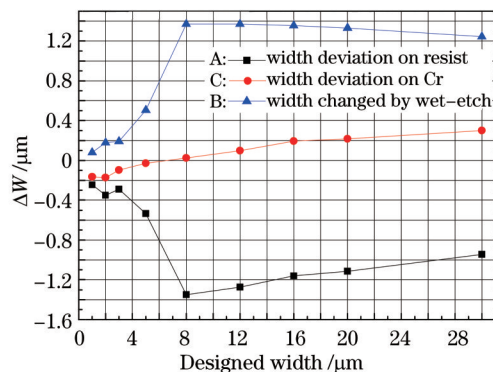


图9 湿法刻蚀展宽曲线

Fig.9 Width changed by wet-etch

3.3 位置误差

CGH一个周期的占空比为50%,线宽偏差的1/2即为CGH一个周期的位置误差,将图9中曲线C的纵坐标乘以1/2,横坐标乘以2,就得到了CGH不同周期的位置误差,DWL4000激光直写系统自身定位误差可达100 nm,引入的位置误差是一个小量,可以忽略掉。将位置误差代入(1)式,就得到CGH不同设计周期位置误差引入的波前误差,如图10所示。

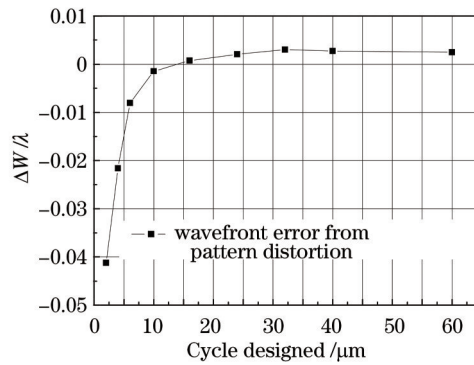


图 10 CGH不同设计周期位置误差引入的波前误差

Fig.10 Wavefront error from pattern distortion of different CGH designed cycles

可以看出这个加工条件下,CGH主区域周期在 $15 \mu\text{m}$ 左右时,制作误差对波前误差的影响最小。加工CGH时,通过调整离焦量使这条位置误差曲线左右移动,使这条曲线的零点位置与CGH主区域周期接近,以最大限度降低加工误差对检测精度的影响。CGH设计周期在 $5 \mu\text{m}$ 以上,引入的波前误差应小于 $\lambda/100$,设计周期大于 $10 \mu\text{m}$ 的CGH波前精度理论上能达到 $\lambda/200$ 。

4 CGH检测实验

根据前面的实验结果,制作了一块直径 80 mm ,最细线宽 $1.8 \mu\text{m}$ 的振幅型CGH。图 11(a)~(c)分别为实物图、检测光路图以及最终检测结果,其中标准反射球表面面形精度优于 $\lambda/1000$ 。该CGH的均方根值为 0.011λ ,波前误差达到了 $\lambda/100$ 量级,以此工艺制作的CGH满足高精度非球面的检验的要求。结合图 10,检测结果符合实验预期。

CGH制作过程中其他的误差来源还包括:1)大幅面Cr层刻蚀非均匀性,即部分区域的钻蚀会导致很大位置偏差,这在湿法刻蚀中普遍存在;2)激光直写系统对圆条纹的多边形拟合带来额外位置误差^[5];3)部分区域会有杂质残余;4)检测过程有震动、气流扰动等。

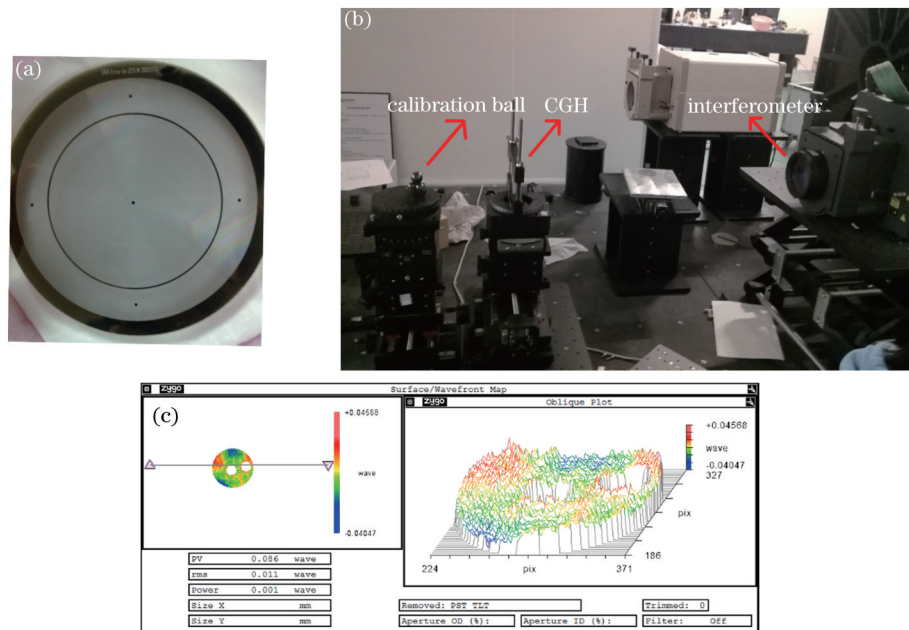


图 11 CGH检测实验.(a) CGH实物图;(b) 检测光路图;(c) 检测结果

Fig.11 CGH detection test. (a) Picture; (b) diagram of detection light path; (c) result of detection

5 结 论

全面分析了CGH的各项制作误差,研究了激光直写不同线宽形成的规律,提出采用沟槽底部线宽评价

CGH的参考,标定了CGH制作过程中不同周期的线宽偏差,得到了不同周期的位置误差引入的波前误差。最终制作出的CGH最细线宽达到 $1.8\ \mu\text{m}$,波前精度达到了 $\lambda/100$ 量级,满足高精度非球面检验的工程应用要求。

参考文献

- 1 Zeng Xuefeng, Yan Feng, Xue Donglin, *et al.*. Distortion correction in testing off-axis asphere with computer-generated hologram [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1109003.
曾雪峰, 闫峰, 薛栋林, 等. 计算全息图补偿检测离轴非球面中的投影畸变校正技术[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1109003.
- 2 Gao Songtao, Sui Yongxin, Yang Huaijiang. High precise test of asphere with computer-generated hologram and error evaluation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0612003.
高松涛, 隋永新, 杨怀江. 用计算全息图对非球面的高精度检测与误差评估[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0612003.
- 3 Glen C Cole, Robert Garfield, Tracy Peters, *et al.*. An overview of optical fabrication of the JWST mirror segments at Tinsley [C]. SPIE, 2006, 6265: 62650V.
- 4 Darragh E O'Donoghue, James O'Connor, Lisa A Crause, *et al.*. Saving SALT: repairs to the spherical aberration corrector of the southern African large telescope (SALT) [C]. SPIE, 2010, 7739: 77390Q.
- 5 Gao Feng, Zhu Jianhua, Huang Qizhong, *et al.*. Computer-generated hologram fabricated by electron-beam direct-writing [J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(6): 556-558.
高峰, 朱建华, 黄奇中, 等. 电子束直写计算全息图[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 556-558.
- 6 J R Salgueiro, V Moreno, J Liñares. Model of linewidth for laser writing on a photoresist [J]. Appl Opt, 2002, 41(5): 895-901.
- 7 Ping Zhou, James H Burge. Optimal design of computer-generated holograms to minimize sensitivity to fabrication errors [J]. Opt Express, 2007, 15(23): 15410-15417.
- 8 Ping Zhou, James H Burge. Fabrication error analysis and experimental demonstration for computer generated holograms [J]. Appl Opt, 2007, 46(5): 657-663.
- 9 Wenrui Cai, Ping Zhou, Chunyu Zhao, *et al.*. Analysis of wavefront errors introduced by encoding computer-generated hologram [J]. Appl Opt, 2013, 52(34): 8324-8331.
- 10 V V Cherkashin, E G Churin, V P Korolkov, *et al.*. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films [J]. SPIE, 1997, 2363: 168-179.
- 11 S Peterhänsel, C Pruss, W Osten. Phase errors in high line density CGH used for aspheric testing: beyond scalar approximation [J]. Opt Express, 2013, 21(10): 11638-11651.
- 12 P Kuttner. Image quality of optical systems for truncated Gaussian laser beams [J]. Opt Engng, 1986, 25(1): 180-183.
- 13 Li Fengyou, Lu Zhenwu, Xie Yongjun, *et al.*. Photolithographic fabrication techniques by using defocusing laser direct writing[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(9): 850-854.
李凤有, 卢振武, 谢永军, 等. 离焦激光直写光刻工艺研究[J]. 中国激光, 2002, 29(9): 850-854.
- 14 Li Fengyou, Xie Yongjun, Sun Qiang, *et al.*. Analyzing of line profile for laser direct writing lithograph [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 32(12): 136-139.
李凤有, 谢永军, 孙强, 等. 激光直写光刻中线条轮廓的分析[J]. 光子学报, 2004, 33(12): 136-139.
- 15 Jun Ma, Zhishan Gao, Rihong Zhu, *et al.*. Problems on fabrication of computer-generated holograms for testing aspheric surfaces [J]. Chin Opt Lett, 2009, 7(1): 70-73.