

变步长搜索的计算全息图编码方法

邱宏伟¹, 金春水^{1*}, 于 杰¹, 刘 钰¹, 张海涛^{1,2}, 王丽萍¹, 孙诗壮¹
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 基于计算全息图(Computer-Generated Hologram, CGH)的非球面检测技术通过控制衍射光相位来生成所需要的参考波前, 从而实现非球面的零位检测, 近年来, 该技术已经发展成为非球面的主流检测技术。对于 CGH 编码, 采用传统编码方法实现高精度编码, 其数据量往往高达几十甚至上百 GB。因此, 为同时确保编码精度高及编码数据量小, 本文提出了一种变步长 CGH 编码方法。该方法首先通过寻找等相位面的方法得到 CGH 条纹分布, 然后通过计算相位分布梯度选取不同的取样步长, 使 CGH 能利用尽可能少的点实现高精度编码。利用变步长搜索的编码方法进行编码并制作了 CGH 对非球面样品进行检测, 检测结果为 3.142 nm (RMS)。为验证检测结果可信度, 本文设计并制作了补偿器对同一非球面进行检测, 其检测结果为 3.645 nm (RMS)。对两检测结果点对点做差, RMS 值为 1.291 nm, 结果表明该编码方法可满足非球面高精度检测需求。

关 键 词: 计算全息图; 计算全息编码; 非球面检测

中图分类号: TQ171.65; O435.2

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2020-0124

CGH encoding with variable step size search

QIU Hong-wei¹, JIN Chun-shui^{1*}, YU Jie¹, LIU Yu¹, ZHANG Hai-tao^{1,2}, WANG Li-ping¹, SUN Shi-zhuang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: jincs@sklao.ac.cn

Abstract: In the field of aspheric testing, Computer-Generated Hologram (CGH) technology has been widely used. For CGH encoding, when applying the conventional encoding method to achieve highly accurate coding, it will use an amount of data that is often up to tens or even hundreds of GB. Therefore, in order to achieve high encoding accuracy with a small amount of encoded data, we propose a variable step size CGH encoding method. This method first obtains CGH fringe distribution through finding isophase surface, then selects different sampling steps by calculating the phase distribution gradient so that the CGH achieves high precision coding using as few points as possible. Finally, the method was used to CGH encode, then the resulting CGH was manufactured to test an aspheric surface. The test result is 3.142 nm (RMS). In order to verify the credibility of the test results, we design and make a compensator to test the same aspheric surface. The

收稿日期: 2020-07-14; 修订日期: 2020-08-12

基金项目: 吉林省地方标准资助项目(No. DB22/T2651-2017)

Supported by Local Standards of Jilin Province (No. DB22/T2651-2017)

test result is 3.645 nm (RMS). The difference between the two results is 1.291 nm (RMS), and shows that the encoding method can meet the requirements of high-precision testing of aspheric surfaces.

Key words: computer-generated hologram; CGH encoding; aspheric test

1 引言

计算全息图(CGH)作为非球面零位补偿检测的关键器件,被广泛应用于非球面检测^[1-4]。与传统的 Dall^[5] 和 Offner^[6] 补偿器不同,CGH 是一种衍射光学元件,它利用光的衍射效应生成与被检非球面面形匹配良好的非球面波前,从而实现非球面的零位检测。高精度 CGH 编码是实现高精度非球面检测的关键之一。

计算全息编码是指将 CGH 相位转换为刻蚀设备可识别的量化位置数据^[7]。由于刻蚀设备只能以折线的方式进行刻蚀,因此需将光滑条纹离散成多边形。为了保证编码精度,通常采用高密度采样逼近理想曲线,从而实现高精度编码。然而,高密度采样意味着编码数据量巨大,导致刻蚀设备内存负担加大,大大增加了刻蚀时间^[8]。因此,需要选择合适的方法对 CGH 进行编码。

目前,常用的 CGH 编码方法有迂回相位编码法、修正离轴参考光编码法、相位轮廓测量术及计算全息干涉编码法等^[9]。其中,迂回相位编码法需近似取值,因此总会引入相位误差,且迂回相位编码方法实现非常困难,不利于产生非球面波。修正离轴参考光编码法由于需要与参考光进行叠加运算,因此增加了计算量。另外,这些方法要实现高精度编码都会使得编码数据量巨大。

针对迂回相位编码不利于产生非球面波的缺点, Jiao Fan 等提出逐点追迹法进行计算。虽然该方法能很好地控制误差,但求解过程太过复杂^[10]。

为了克服上述问题, Ma Jun 等人提出了一种在不同径向位置选择不同采样密度的方法来近似计算全息图条纹,但是该方法对于曲率连续变化的条纹近似效果并不理想^[11]。

针对迂回相位编码、修正离轴参考光以及计算全息干涉等编码方法存在的编码精度与编码数据量之间的矛盾,本文提出了一种变步长 CGH 编码方法。该方法根据编码精度的需求可以简单便捷地选择采样步长,以最小的编码数据量实现高精度编码。该编码方法还具有能够减轻刻蚀设

备内存负担以及降低 CGH 制作时间成本等优点。

2 编码原理

假设 CGH 产生的波前相位函数表示为 $\Phi(x, y)$, 并令:

$$\Phi(x, y) = m \sum_{i=1}^N A_i Z_i(x, y) = N m \pi \quad (1)$$

其中 N 为整数, m 为衍射级次。函数 $\Phi(x, y)$ 的编码过程如图 1 所示。由图 1 可知, CGH 的编码过程可分为两步: 首先, 解算式(1)得到等相位曲线分布, 如图 1(a) 所示; 然后, 将得到的各等相位曲线离散采样, 实现量化编码, 如图 1(b) 所示。

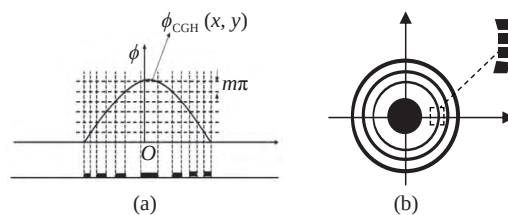


图 1 CGH 编码过程。(a)由相位轮廓干涉图计算相位函数; (b)条纹编码成多边形

Fig. 1 CGH encoding process. (a) Wavefront phase function calculated by phase contour interferograms; (b) encoding the fringes into polygons

传统的 CGH 编码方法采用增大采样密度的方式来提高编码精度。然而,这一方式虽可提高精度,但相应的编码数据量将急剧增加。为了减少编码数据量,同时最大程度地提高编码精度,本文提出基于相位分布梯度大小选择采样密度的方式来实现目标。编码过程如下:

- (1) 根据被测非球面设计 CGH, 并计算相位分布 $\Phi(x, y)$;
- (2) 计算 $\Phi(x, y)$ 的梯度分布;
- (3) 根据 $\Phi(x, y)$ 的梯度分布情况动态选择采样步长进行编码, 并保存数据;
- (4) 将数据转换为 GDS II 或 OASIS 等刻蚀机器可读格式。

CGH 的相位函数表示为 $\Phi(x, y)$, 那么其在二

维矢量场的梯度为:

$$\Delta\Phi(x,y) = (\Phi_x, \Phi_y) \quad (2)$$

其中 $\Phi_x = [\partial\Phi(x,y)/\partial x]$, $\Phi_y = [\partial\Phi(x,y)/\partial y]$ 。

等相位曲线离散采样过程如图 2 所示,在这一过程中,会不可避免地导致实际条纹与理想条纹产生偏差,根据前人的分析,编码误差与波长、衍射级次及编码偏差成正比,与局部条纹周期成反比^[12]。因此,引起的局部波前误差 $\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)$ 可表示为:

$$\Delta W_{\text{RMS}}(x,y) = -m \cdot \lambda \cdot \frac{\delta(x,y)}{S(x,y)} \quad (3)$$

其中, λ 为波长, $S(x,y)$ 为局部条纹周期, $\delta(x,y)$ 为实际条纹与理想条纹的偏差。

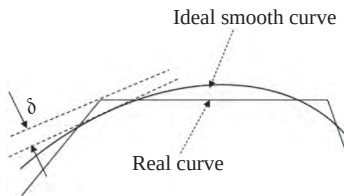


图 2 理想条纹数值化示意图

Fig. 2 The digitization process of ideal fringe

为达到满足使用需求的编码精度,需要减小编码的局部偏差 $\delta(x,y)$ 。局部偏差 $\delta(x,y)$ 与编码采样步长 $L(x,y)$ 的几何关系如图 3 所示。

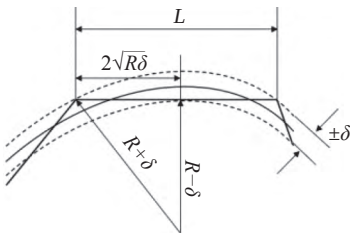


图 3 编码采样步长与编码偏差几何关系图

Fig. 3 Geometric relationship between encoding sampling step and encoding deviation

由图 3 可知两者满足以下关系

$$L(x,y) = 4\sqrt{R \cdot \delta(x,y)} \quad (4)$$

其中 $R = 1/c$, $\sigma = \delta(x,y)/S(x,y)$ 。

根据采样频率与采样步长的关系,采样频率 $\gamma(x,y)$ 可表示为:

$$\begin{aligned} \gamma(x,y) &= 1/L(x,y) \\ &= \frac{1}{4} \sqrt{\frac{c}{\delta(x,y)}} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $c=1/R$ 。根据 Wenrui Cai 的分析,采样频率 $\gamma(x,y)$ 可表示为^[11]:

$$\gamma(x,y) = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{S(x,y)|k_c|}{\delta(x,y)\lambda/P(x,y)}} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{|k_c|}{\sigma(x,y)\lambda/P(x,y)}} \quad (6)$$

其中 $\sigma(x,y) = \delta(x,y)\lambda/S(x,y)$, k_c 为相位等高线的曲率,表达式为 $k_c = -(\Phi_x^2\Phi_{xx} - 2\Phi_x\Phi_y\Phi_{xy} + \Phi_y^2\Phi_{yy})/P(x,y)^3$, Φ_{xx} 、 Φ_{yy} 为相位函数的二阶偏导数,其中 $P(x,y) = \sqrt{\Phi_x^2 + \Phi_y^2}$ 。CGH 编码引起的局部相位误差可表示为:

$$\Delta W_{\text{RMS}}(x,y) = \frac{\sigma(x,y)\lambda}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \left[\frac{P(x,y)/\lambda - f_{\text{cutoff}}}{P(x,y)/\lambda - \gamma(x,y)} \right]^2} \quad (7)$$

其中 f_{cutoff} 为干涉仪截止频率, $f_{\text{cutoff}} \geq \gamma(x,y)$, 则整体编码误差 ΔW_{total} 可表示为^[12]:

$$\Delta W_{\text{total}} = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \Delta W_{\text{RMS}}(x,y) \quad (8)$$

通过上述分析,建立了采样步长与编码误差之间的联系。为动态选择编码步长,需先确定编码所需达到的精度。根据式(7)可得:

$$\gamma(x,y) = \frac{\sigma(x,y)^2\lambda^2 f_{\text{cutoff}}^2 - 2\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)^2 P(x,y)/\lambda}{\sigma(x,y)^2\lambda^2 - 2\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)^2} \quad (9)$$

采样步长可表示为:

$$L(x,y) = \frac{1}{\gamma(x,y)} = \frac{\sigma(x,y)^2\lambda^2 - 2\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)^2}{\sigma(x,y)^2\lambda^2 f_{\text{cutoff}}^2 - 2\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)^2 P(x,y)/\lambda} \quad (10)$$

根据式(3)求得 $\delta(x,y)$ 与 $\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)$ 的关系为:

$$\delta(x,y) = -\frac{\Delta W_{\text{RMS}}(x,y) \cdot S(x,y)}{m \cdot \lambda} \quad (11)$$

将式(11)以及 $\sigma(x,y) = \delta(x,y)/S(x,y)$ 代入式(10)得:

$$L(x,y) = \frac{\left[-\frac{\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)}{m} \right]^2 - 2W_{\text{RMS}}(x,y)^2}{\left[-\frac{\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)}{m} \right]^2 f_{\text{cutoff}}^2 - 2\Delta W_{\text{RMS}}(x,y)^2 P(x,y)/\lambda} \quad (12)$$

至此,便可根据编码需求动态选择编码步长进行编码。由于刻蚀机器只能识别特定格式的文件,因此需将编码数据转为 GDS II 格式文件^[13-14]。

3 仿真过程

对一高次非球面设计了零位补偿 CGH, 非球面可表示为:

$$Z = \frac{C\rho^2}{1 + [1 - (K+1)C^2\rho^2]^{1/2}} + A_1\rho^4 + A_2\rho^6, \quad (13)$$

式中 Z 为非球面矢高, K 为二次曲面常数, A_1 、 A_2 为高次项系数, ρ 为非球面径向坐标, C 为非球面顶点曲率。非球面的具体参数如表 1 所示。

表 1 非球面参数

Tab. 1 Parameters of the aspheric lens

R	D	K	A_1	A_2
-310.08	63	3.275	-2.148×10^{-8}	-1.137×10^{-12}

在计算全息图的设计阶段, 必须考虑以下 4 个方面: 衍射杂光的分离与去除、降低条纹密度、限制 CGH 口径以及约束投影畸变。为提高 CGH 的设计效率, 建立了 CGH 设计模型^[5]。该模型综合考虑了上述 4 方面, 将非球面参数代入模型, 得出 CGH 在光路中的位置与所需加载的载频量(其中 CGH 口径为 63 mm), 利用等光程原理计算 CGH 相位, 相位分布如图 4(彩图见期刊电子版)所示。对相位梯度进行求解, 结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示。

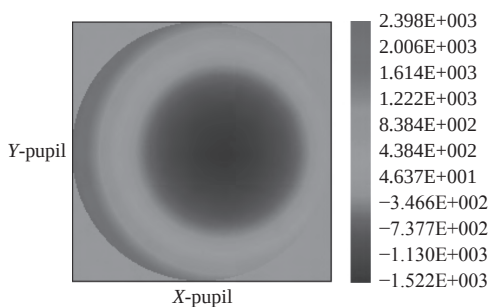


图 4 CGH 相位分布示意图

Fig. 4 Phase distribution of the CGH

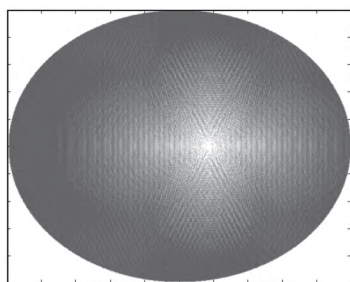


图 5 CGH 相位函数梯度分布

Fig. 5 Gradient distribution of the CGH phase function

根据第 2 节所述的编码原理以及编码精度要求, 将编码误差容限设为 0.03 nm, 编写程序对 CGH 进行编码, 结果如图 6(彩图见期刊电子版)所示。编码后的最小条纹间距为 11 μm , 最大条纹间距为 480 μm 。完成上述过程后, 利用传统编程方法对同一 CGH 进行编码, 其数据量高达 160 GB, 本文所提出的方法数据量仅为 3 GB, 且相较于传统方法, 其计算时间大大缩短, 仅为 16 小时。

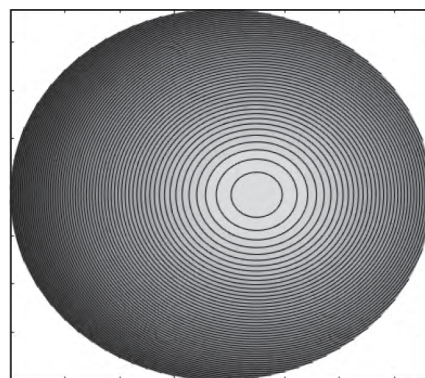


图 6 CGH 条纹分布示意图

Fig. 6 Fringe distribution of CGH

4 实验与分析

为验证本文所述的 CGH 编码方法, 设计了对比实验进行验证。所有元件加工完成后, 对非球面进行检测。由于检测系统误差主要为 CGH 基底误差, 因此, 为了避免 CGH 基底对检测产生的影响, 利用零级衍射光对 CGH 的基底误差进行标定, 标定光路如图 7 所示(图中虚线框代表将 CGH 从标定光路取出的过程, TF(Transmission Flat)、RF(Reference Flat)为平面标准具), 基底误差标定结果为: $PV=24.361 \text{ nm}$, $RMS=2.059 \text{ nm}$, 如图 8(彩图见期刊电子版)所示。

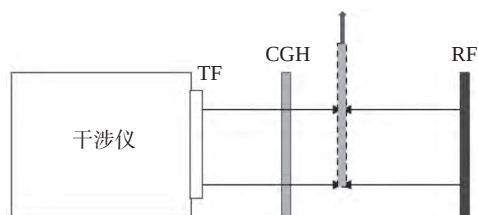


图 7 标定光路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of calibration optical path of the CGH substrate error

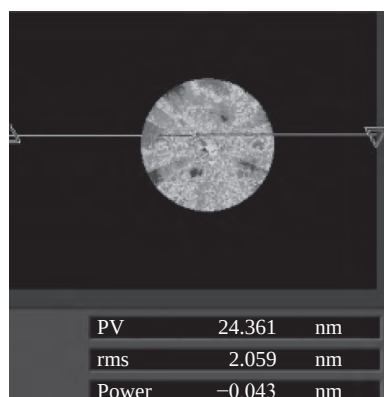


图 8 CGH 基底误差

Fig. 8 CGH substrate error

完成 CGH 基底误差标定后, 利用如图 9 所示的光路对非球面进行检测, 非球面镜实物如图 10 所示。实验过程中, 通过观察干涉条纹实现各元件的对准。为了验证 CGH 法检测非球面的可信度, 本文使用零位补偿器对非球面进行检测, 两者的检测结果如图 11(彩图见期刊电子版)所示。

从图 11 可以看出, 零位补偿镜的检测结果如下: PV 值为 18.067 nm, RMS 值为 3.645 nm, CGH 的检测结果如下: PV 值为 15.304 nm, RMS 值为 3.142 nm, 两者 RMS 数值仅相差 0.503 nm。将 CGH 检测结果与补偿镜检测结果进行点对点做差, 结果如图 12 所示。

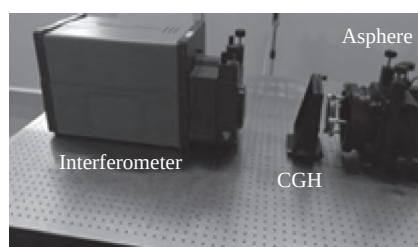


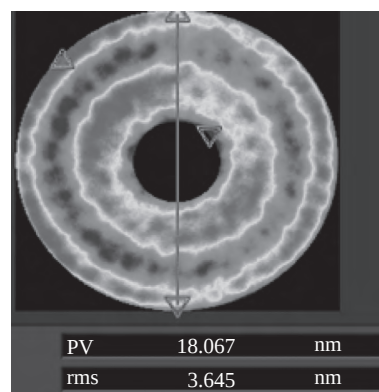
图 9 非球面检测装置光路图

Fig. 9 Optical path of the aspheric detection installation



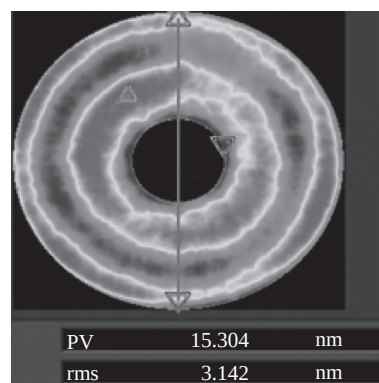
图 10 被检非球面镜

Fig. 10 Tested aspheric mirror



(a) 零位补偿镜检测结果

(a) Test result of a null lens

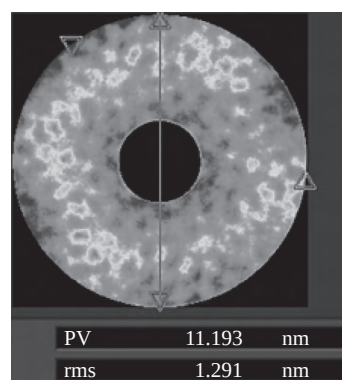


(b) CGH 检测结果

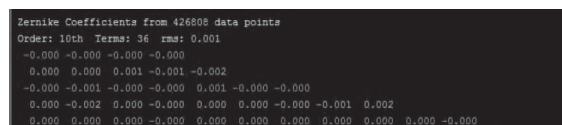
(b) Test result of the CGH

图 11 两种方法的非球面检测结果对比

Fig. 11 The test results of the aspheric mirror by proposed method and zero compensator



(a) 补偿镜与 CGH 检测结果面形偏差

(a) Comparison between the CGH and compensator
PV=11.193 nm, RMS=1.291 nm

(b) 面形偏差的 Zernike 系数

(b) Zernike coefficient of comparison results with a null lens

图 12 CGH 与补偿镜检测结果对比

Fig. 12 Comparison of test results of CGH and null lens compensator

由图12可以看出,CGH法与补偿器法的检测结果相减后RMS值为1.291 nm,各项Zernike系数差值均在 0.002λ ($\lambda=632.8$ nm)以内,表明本文提出的CGH编码方法能够实现非球面高精度编码。

5 结 论

本文提出了一种基于CGH相位梯度动态选择步长的编码方法,该方法能够有效解决传统编

码方法的编码精度与编码数据量存在矛盾的问题,且能够满足非球面高精度检测的需求。本文设计、编码并制作了CGH检测非球面,检测结果为3.142 nm (RMS)。为验证CGH检测非球面结果的可靠性,本文将零位补偿镜对非球面的检测结果与CGH检测结果进行对比,补偿镜检测结果为3.645 nm (RMS)。对CGH和补偿镜的检测结果进行点对点做差,RMS为1.291 nm,且各Zernike项的差值都小于等于 0.002λ ,说明了该编码方法可满足非球面高精度检测的需求。

参考文献:

- [1] 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.
GAO S T, SUI Y X, YANG H J. High precise testing of asphere with computer-generated hologram and error evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0612003. (in Chinese)
- [2] ZHANG H D, WANG X K, XUE D L, *et al.* Modified surface testing method for large convex aspheric surfaces based on diffraction optics[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(34): 9398-9405.
- [3] 何宇航,李强,高波,等.基于计算全息元件的大口径非球面透镜透射波前检测方法[J].激光与光电子学进展,2019,56(2):021202.
HE Y H, LI Q, GAO B, *et al.* Measurement of the transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens based on computer-generated hologram[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(2): 021202. (in Chinese)
- [4] 闫公敬,张宪忠.非零位凸非球面自控精拼接检测技术研究[J].中国光学,2018,11(5):798-803.
YAN G J, ZHANG X ZH. Research on non-null convex aspherical sub-aperture stitching detection technology[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 798-803. (in Chinese)
- [5] 高松涛.超高精度非球面自控精拼接检测技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2014.
GAO S T. Research on ultra-precise aspheric surface testing[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese).
- [6] 彭建涛.基于计算全息的拼接式大口径光学系统检测与共相技术研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2017.
PENG J T. Research on the optical testing and Co-phasing technology for large aperture segmented mirror systems based on computer-generated holograms[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese).
- [7] 张海东,王孝坤,薛栋林,等.一种针对超大口径凸非球面的面形检测方法[J].中国光学,2019,12(5):1147-1154.
ZHANG H D, WANG X K, XUE D L, *et al.* Surface testing method for ultra-large convex aspheric surfaces[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1147-1154. (in Chinese)
- [8] XIAO X SH, YU Q H, ZHU ZH T, *et al.* Encoding method of CGH for highly accurate optical measurement based on non-maxima suppression[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(11): 111201.
- [9] 虞祖良,金国藩.计算机全息图[M].北京:清华大学出版社,1984.
YU Z L, JIN G F. *Computer-Generated Hologram*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984. (in Chinese)
- [10] JIAO F, DAVID Z, URQUHART K S, *et al.* Efficient encoding algorithms for computer-aided design of diffractive optical elements by the use of electron-beam fabrication[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(14): 2522-2533.
- [11] MA J, GAO Z S, ZHU R H, *et al.* Problems on fabrication of computer-generated holograms for testing aspheric surfaces[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(1): 70-73.
- [12] CAI W R, ZHOU Z, ZHAO CH Y, *et al.* Analysis of wavefront errors introduced by encoding computer-generated holograms[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(34): 8324-8331.
- [13] DHARMAVARAPU R, BHATTACHARYA S, JUODKAZIS S. GDOESII: software for design of diffractive optical

elements and phase mask conversion to GDS II lithography files[J]. *SoftwareX*, 2019, 9: 126-131.

[14] 尹放, 尹冀波. CIF和GDS II 格式版图数据的直接转换[J]. *微处理机*, 2001(3): 14-15, 19.

YIN F, YIN J B. The direct conversion for CIF and GDS II [J]. *Microprocessors*, 2001(3): 14-15, 19. (in Chinese)

作者简介:



邱宏伟(1993—), 男, 江西丰城人, 硕士研究生, 2016 年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事非球面检测方面的研究。E-mail: qiu hongwei321@163.com



金春水(1964—), 男, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2003 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事紫外-极紫外成像光学、紫外-极紫外光学薄膜技术及超高精度光学检测方面的研究。E-mail: jincs@sklao.ac.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4; 国内外公开发刊, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- | | |
|-----------------|----------------|
| ★ 荷兰 Scopus 数据库 | ★ 中国精品科技期刊 |
| ★ 美国《乌利希国际期刊指南》 | ★ 中国科技核心期刊 |
| ★ 美国《化学文献》 | ★ 中国光学学会会刊 |
| ★ 波兰《哥白尼索引》 | ★ 中国科技论文与引文数据库 |
| ★ 俄罗斯《文摘杂志》 | ★ 中国期刊全文数据库 |
| ★ 美国工程索引(Ei)数据库 | ★ 万方数字化期刊全文数据库 |
| ★ 美国 ESCI 数据库 | ★ 中国科技期刊数据库 |
| | ★ 中国光学期刊网数据库 |

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061 传 真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)