

文章编号:1007-2780(2018)03-0245-09

用于智能显示的相位型计算全息图的设计

张梦妮, 张 锦*, 蒋世磊, 孙国斌, 弥 谦, 王 震, 张 强, 武耀霞

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要:介绍了一种基于相息图原理的用于智能显示的纯相位型计算全息图的设计方法,并在此基础上,以雪花图形和分划板图形为例,完成了全息元件实验样件的制作及全息再现实验,这种实时再现的图像可以用于智能显示。在已知记录介质折射率的情况下,通过控制纯相位型计算全息图记录介质表面微结构的宽度和高度来调制光波,得到所需图像。采用逐步迭代的傅里叶变换算法来获取纯相位型计算全息图的相位结构,为了降低相位型计算全息图的制作难度,提出量化数学模型,并对所设计的相位结构进行量化处理,给出了纯相位型计算全息图的 4 台阶浮雕型相位结构。全息元件的尺寸设定为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,工作波长为 650 nm ,衍射结构的最小特征尺寸为 $8\text{ }\mu\text{m}$ 。理论计算和模拟再现像的结果表明,在未考虑加工误差的条件下,所提供的这种用于智能显示的纯相位型计算全息图的设计方法是可行的。此方法可推广用于其它任意特定图案的纯相位型计算全息图的设计,也可用于设计具有光束整形功能的衍射光学元件,如离轴照明的光束的整形匀光器件等。用于智能显示时,用平行光照射制作的实验样件,只得到的单一的衍射图像,不存在其他衍射级次的图像,在考虑采用台阶量化结构和存在加工误差的情况下,衍射效率仍然很高。若改变设计的全息图相位的正负,并用平行光以特定的角度照射制作此相位型计算全息图,可用于全息瞄准。

关键词:智能显示;纯相位型计算全息图;量化相位结构;相息图;衍射光学元件

中图分类号:O436;O438 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183303.0245

Design of phase type computer-generated- hologram for intelligent display

ZHANG Meng-ni, ZHANG jin*, JIANG Shi-lei, SUN Guo-bin,
MI Qian, WANG Zhen, ZHANG Qiang, WU Yao-xia(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University,
Xi'an 710021, China)

Abstract: The design method of the pure-phase type computer-generated-hologram for intelligent display based on the principle of the kinoform has been introduced. On this basis, taking snowflake pattern and reticle pattern as examples, experimental samples of holography elements was developed, and holographic reconstruction is completed, real-time reconstruction images can be used for intelligent display. Method: The reconstruction images could be obtained by controlling the height and

收稿日期:2017-10-09;修订日期:2018-12-26.

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科研计划(No.13JS038);陕西省科技厅重点实验室项目(No.2013SZS14-P01);西安工业大学校长科研基金(No.XAGDXJJ1303)资助

Supported by Key Laboratory Research Plan of Education Department of Shaanxi Provincial Government (No.13JS038); Key Laboratory Project of Shaanxi Provincial Department of Science and Technology(No. 2013SZS14-P01); President Research Fund of Xi'an Technological University(No.XAGDXJJ1303)

* 通信联系人, E-mail: zhangjin@xatu.edu.cn

width of micro-structures on the surface of recording medium material with a certain refractive index. The iterative Fourier transform algorithm has been used to calculate the phase structure of the pure-phase type computer-generated-hologram. At the same time, the quantitative mathematical model has been given, and 4 steps relief structure have been obtained. The sizes of the pure-phase type computer-generated-hologram has been set to be $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$, the working wavelength is 650 nm , the minimum feature size of the diffractive structures is $8\text{ }\mu\text{m}$. The theoretical calculation result and the reconstruction simulation result show that the design method of the pure-phase type computer-generated-hologram for intelligent display is feasible in the case of un-considering fabrication errors. This method can also be used to design the pure-phase type computer-generated-hologram of other specific patterns. It can also be used to design diffractive optical elements for beam shaping, such as the optical beam shaping and optical beam homogenizer of the off-axis illumination. The pure-phase computer-generated-hologram is illuminated by a plane wave for intelligent displays, the high diffraction efficiency could be obtained because a single diffraction image could be reconstructed without other diffraction images. The positive and negative of phase of the hologram is changed in this design, the hologram is illuminated by a plane wave at a specific angle, which can be used for holographic sight

Key words: intelligent display; pure-phase computer-generated-hologram; quantitative phase structure; kinoform; diffractive optical element

1 引言

衍射微光学器件的设计问题十分类似于光学变换系统中的相位恢复问题,计算全息与衍射微光学的研究重点主要集中在超精细衍射结构的分析理论与设计。不同于其他计算全息图,相息图仅仅编码了物光波的相位信息,它具有很高的衍射效率并能同轴再现单一图像,是光波重构的理想元件。随着微细加工技术的快速发展,由于其全透明并且表面为浮雕结构的显著特点,在元件的复制加工方面有着极大的优势,越来越具有吸引力,因此也促使光学工作者对这种类型的衍射元件的设计,从成像理论上和设计方法上均需开展深入的研究。

将相息图与衍射场数值计算方法相结合,遵循衍射场传播规律,建立衍射光场数理模型,利用基尔霍夫衍射公式对衍射光学器件的衍射场分布进行数值计算,并基于衍射光学元件精细化设计原则,确定纯相位型计算全息图的取样点数和取样间隔^[1]。在计算机数值计算的基础上,采用逐步迭代傅里叶变换算法获取纯相位型分划板的相位结构和记录介质表面的宽度和高度(深度),在考虑再现像的衍射效率的情况下,提出对所设计

的初始的纯相位型分划板的相位进行量化处理,建立数学量化模型,获得 4 台阶浮雕型相位结构,并使用传统套刻法完成这种复杂微结构实验样件的制作。

本文介绍了用于全息显示的相位型衍射元件的设计,并选择相息图式的纯相位型计算全息图作为要设计的全息元件,以雪花图形为例,完成了实验样件的制作及再现实验。一般的“智能全息(Smart Holographics)”是指基于人眼视角位置而成像,使人眼产生的视觉效果与实际环境感觉一样。其使用全息显示技术来追踪人眼的视角位置,并建立全息图像数据模型来计算出实际的全息图像,再通过特殊的指向性显示屏幕将左右眼的立体图像精准投射到视网膜中。本文所设计相位型衍射元件,在保持高的衍射效率和能量利用率的情况下,可通过模压复制实现批量生产,克服了传统光学全息元件加工质量不稳定和使用寿命短的缺陷。这种全息技术形成的全息图像同时显示全部视场的影像信息,实时再现所需图形,可以用于全息显示。

2 基本原理

记录平面上的物光波都可以写成数学

形式^[2]:

$$f(x, y) = a(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \quad (1)$$

纯相位型计算全息图不同于其他计算全息图,通过控制记录介质的高度差,改变其光学厚度去调制入射光波的相位分布,再现原始物光波^[3]。根据衍射光场数理模型及基尔霍夫衍射积分模型^[1],如图1所示。以特定角度入射的平面波的表达式为

$$g_0(x, y) = \exp[ik(x \cos \alpha + y \sin \beta)] \quad (2)$$

其中: α 和 β 分别为入射光与 x 轴和 y 轴的夹角。衍射光学元件的复振幅透过率为

$$t(x, y) = \exp[i\varphi(x, y)] \quad (3)$$

其中: $\varphi(x, y)$ 为衍射器件的相位分布。

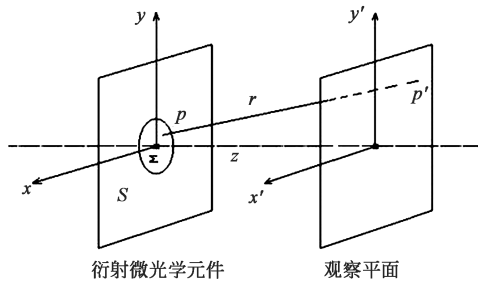


图1 衍射场分析模型示意图

Fig.1 Sketch of diffraction field analysis model

物平面和纯相位型计算全息图的距离为 d ,它与衍射距离之间满足以下关系:

$$z_d = \frac{d \cdot \lambda}{\lambda_0} \quad (4)$$

当 $\lambda_0 = \lambda$ 时, $z_d = d$,纯相位型计算全息图取样间距、输出平面的间隔大小与衍射距离、光波波长及再现图像在 ξ 与 ζ 两个方向的采样点数 K 和 L 满足以下关系^[4-5]

$$\begin{cases} \Delta \xi \cdot \Delta x = \frac{Z_d \cdot \lambda}{K} \\ \Delta \zeta \cdot \Delta y = \frac{Z_d \cdot \lambda}{L} \end{cases} \quad (5)$$

利用(1)式和式(5)对衍射光学器件的衍射场分布进行数值计算,最终获得衍射光学元件的相位值分布 $\varphi(x, y)$ 。

3 设计方法与模型

3.1 设计方法

采用逐步迭代的傅里叶变换算法获取纯相位

型计算全息图的相位结构,在已知记录介质折射率的情况下,直接控制记录介质各点的高度(或深度)值来重构原始图像^[4,6]。根据惠更斯菲涅耳原理,输出平面光场分布为

$$u(\xi, \zeta) = \frac{1}{i\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \frac{\exp(ikr)}{r} K(\theta) dx dy \quad (6)$$

式中 (ξ, ζ) 为输出平面上某点的位置坐标,光波传播距离为 $r = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\zeta - y)^2 + z_d^2}$, z_d 是衍射距离, $K(\theta)$ 为倾斜因子。

逐步迭代傅里叶变换算法是在物平面和谱平面上施加已知的限制条件,并引入在一定范围内具有随机分布的相位反馈因子 β 代替固定反馈因子,再在物平面和谱平面循环迭代的算法,将物光波函数代入基尔霍夫衍射公式,得到其谱面波函数,再将新谱面波函数代入基尔霍夫逆衍射积分公式得到物面波函数。每一次迭代中对 β 的任一随机值计算得到的复振幅与前一次进行比较,如果更接近实际值,则进入下一步优化^[7-10], β 的引入抑制了迭代的“自陷”。并且基于相位混合算法,并引入振幅反馈因子 α 及相位反馈因子 β ,亦可抑制迭代的“自陷”。此逐步迭代傅里叶变换算法的迭代过程为

$$\begin{cases} U_o^{(k)} = \left(\sqrt{I_o} + \alpha \cdot \left| \sqrt{I_o} - |U_o^{(k)}| \right| \right) \exp[i \arg(U_o^{(k)})] \\ U_i^{(k+1)} = F^{-1}\{U_o^{(k)}\} \\ U_i^{(k+1)} = \left| \sqrt{I_i} \right| \exp \left\{ i \left[\beta \cdot \arg(U_i^{(k+1)}) + (1 - \beta) \cdot \arg(U_i^{(k)}) \right] \right\} \\ U_o^{(k+1)} = F\{U_i^{(k+1)}\} \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\arg(*)$ 代表复振幅相位值。

每一步迭代过程中,会不断变化,使得更接近理想值,达到不断优化的目的,通过对迭代傅里叶算法的改进,在相位调制过程中,解决了之前的算法收敛速度慢、精度低的问题。

用于智能显示时,平行光照射制作的实验样件,在零级方向得到的单一的衍射图像,若改变设计的全息图相位的正负,并用平行光以特定的角度照射设计的纯相位型计算分划板,可用于全息瞄准^[11]。

3.2 量化数学模型

通过逐步迭代算法获取的相位结构比较复杂,考虑到制作难度,提出对设计获得的计算全息图的相位结构进行量化处理,通过建立量化数学模型,用数学的方法确定各量化台阶所对应的相位值。相位值分布 $\varphi(x, y)$ 取模除 2π 的余数,一般情况下,量化台阶数可选取 2 和 4 台阶,量化的相位值满足^[12-13]:

$$\varphi(x, y) = \frac{2n\pi}{L}, n = 0, 1, \dots, L-1, \quad (8)$$

其中: L 是量化阶数,量化后其全息再现像的衍射效率将有所下降,综合考虑加工难度和衍射效率,选择合适的量化台阶数。

计算机仿真获得相位型计算全息图的所有取样点的相位值,建立量化数学模型,用数学的方法相位进行量化处理。其中所有取样点相位平均值为 aa_0 ,最大值为 aa_1 ,最小值为 aa_2 ,在平均值、最大值及最小值中间连续进行两次中值划分, aa_0 与 aa_2 的平均值记为 a_1 , aa_0 与 aa_1 的平均值记为 a_2 , aa_2 与 a_1 的平均值为记 a_3 , a_1 与 aa_0 的平均值为记 a_4 , aa_0 与 a_2 的平均值为 a_5 , a_2 与 aa_1 的平均值为 a_6 。获得 a_3, a_4, a_5, a_6 这 4 个相位值,进一步将起始值归化为 0,其他值随之改变,这样复杂相位结构被量化成 4 台阶浮雕型相位结构。图 2 是量化为 4 台阶的相位值分布示意图。

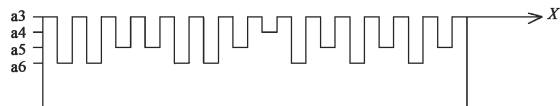


图 2 量化为 4 台阶的相位值分布示意图

Fig. 2 Scheme of the fourth steps quantitative phase distributions

4 结构参数与设计结果

输入和输出平面内抽样间距的选取遵循抽样定理,在满足实际运算量可承受的范围内,适当减小抽样间距,提高抽样频率。在已知条件的基础上进行数学计算,确定纯相位型计算全息图的采样间距和采样点数。图 3 是原始雪花图像,通过正、逆向衍射变换,得到输出/输入平面光场,引入限制条件,经多次循环迭代来求解出相位结构^[14-15]。

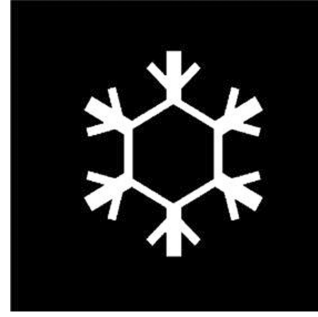


图 3 原始雪花图像

Fig.3 Original snowflake pattern

4.1 初始参数与数值计算

设计的雪花图像的相位型计算全息图的大小为 $D_x \times D_y = 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, D_x 为计算全息图在 x 方向的尺寸, D_y 为在 y 方向的尺寸;衍射距离为 $z_d = 320 \text{ mm}$;再现像大小为 $D_\xi \times D_\zeta = 6 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, D_ξ 为计算全息图在 ξ 方向的尺寸, D_ζ 为计算全息图在 ζ 方向的尺寸;入射光波波长为 $\lambda = 650 \text{ nm}$;入射面和出射面的中心的连线与光轴重合。

根据基尔霍夫衍射变换函数的抽样原则及具体计算公式,计算可得到输入平面在 x 和 y 方向的抽样间距 Δx 和 Δy ,及输出平面在 ξ 和 ζ 方向的抽样间距 $\Delta \xi$ 和 $\Delta \zeta$ 。

$$\begin{cases} \Delta x_0 = 0.03467 \text{ mm}, \Delta y_0 = 0.03467 \text{ mm} \\ \Delta \xi_0 = 0.03467 \text{ mm}, \Delta \zeta_0 = 0.03467 \text{ mm} \end{cases} \quad (9)$$

保证变换函数近似满足抽样定理,可选取:

$$\begin{cases} \Delta x = 0.23\Delta x_0 = 0.008 \text{ mm} \\ \Delta y = 0.23\Delta y_0 = 0.008 \text{ mm} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta \xi = 0.4\Delta \xi_0 = 0.01387 \text{ mm} \\ \Delta \zeta = 0.4\Delta \zeta_0 = 0.01387 \text{ mm} \end{cases} \quad (11)$$

此时可计算得到纯相位型计算全息图在 x 和 y 方向的取样点数 M 和 N ,及输出平面期望区域在 ξ 和 ζ 方向的取样点数 K_0 和 L_0 。

$$\begin{cases} M \times N = \frac{x}{\Delta x} \times \frac{y}{\Delta y} = 750 \times 750 \\ K_0 \times L_0 = \frac{\xi}{\Delta \xi} \times \frac{\zeta}{\Delta \zeta} = 433 \times 433 \end{cases} \quad (12)$$

4.2 设计结果

多次循环迭代后物面波的相位分布就是所设计的相位型计算全息图的相位分布。图 4(a), (b)是所设计的全息元件衍射面的二维和三维相位分布。若记录介质的折射率为 n ,光程与相位

之间的关系为

$$\Delta = \frac{\varphi}{k} = \frac{\varphi \cdot \lambda}{2\pi} = (n-1)h, \quad (13)$$

因此

$$h = \frac{\varphi \cdot \lambda}{2\pi \cdot (n-1)}, \quad (14)$$

h 是记录介质表面微结构的高度,图 4(c),(d)是记录介质表面微结构,图 5 是计算机再现的雪花图像。

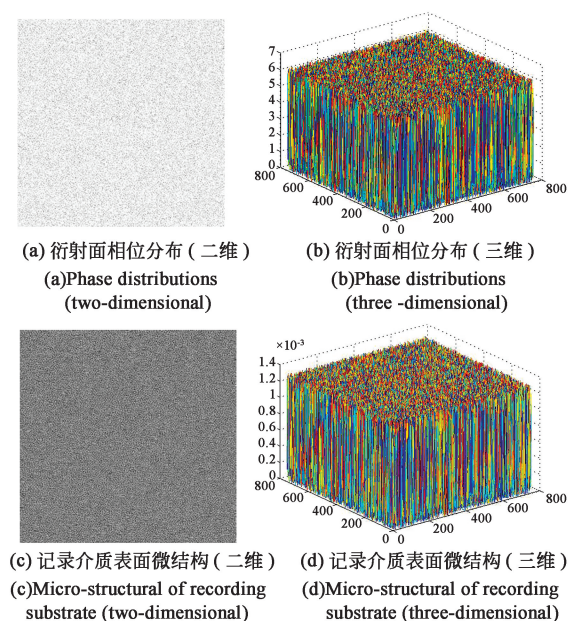


图4 全息衍射面的相位分布及记录介质表面微结构

Fig.4 Phase distributions of holographic diffraction optical element and the micro-structural of recording substrate

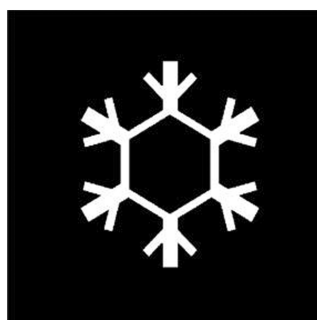


图5 全息再现像

Fig.5 Reconstructed image

对获取的复杂相位结构进行量化处理,可减小纯相位型计算全息图的制作难度,有利于纯相位型

全息元件制作方法的进一步研究。图 6 是对应的 4 台阶浮雕型相位分布及记录介质的表面微结构。

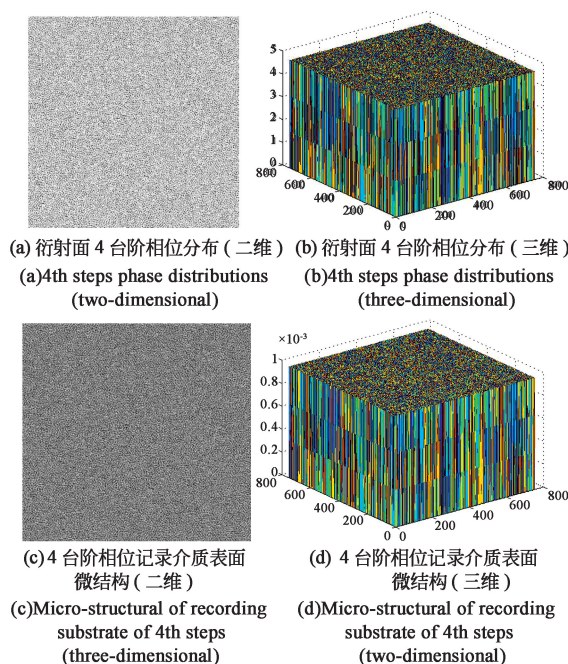


图6 衍射面 4 台阶相位分布及记录介质表面微结构

Fig.6 The 4th steps phase distributions of diffraction optical element and the micro-structural substrate of the surface of recording

量化阶数取 2 台阶时,由于其衍射效率的限制,再现像有共轭像。本文所设计的纯相位型计算全息图的量化台阶数取 4 台阶,图 7 是雪花图案的再现像,以上完成计算机仿真的整体过程^[16-18]。

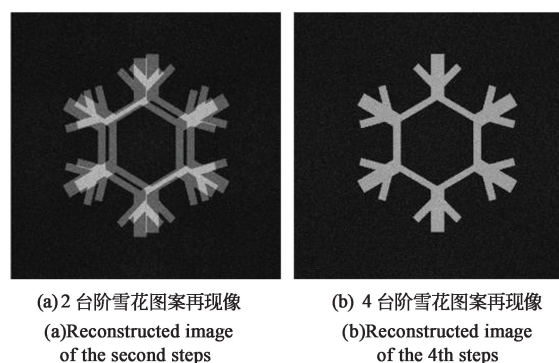


图7 雪花图案的全息再现像

Fig.7 Reconstructed image of the snowflake pattern

表 1 是量化过程中各量化参数对应的在 $(-\pi, \pi)$ 之间的相位值。

表 1 量化后的相位值
Tab.1 Quantized phase values

量化参数	相位值
a_1	1.5
a_2	1.5
a_3	2.3
a_4	-2.3
a_5	0.7
a_6	-0.7
aa_0	0
aa_1	3.1
aa_2	-3.1

表 2 是量化为 4 台阶时各台阶分别对应的相位值,并将相位值转换在 $(0,2\pi)$ 之间。

表 2 量化台阶分别对应的相位值
Tab.2 Phase values corresponding to quantization steps

量化台阶	相位值
1	0
2	1.571 5
3	3.142 2
4	4.712 3

表 3 是采用玻璃作为记录介质时,各量化台阶分别对应的衍射元件表面浮雕结构的深度。

表 3 量化台阶分别对应的记录介质表面高度
Tab.3 Height of the recording medium corresponding to quantization steps

量化台阶	高度/nm
1	0
2	316.53
3	632.90
4	949.18

5 实验样件的制作

台阶型轮廓的衍射微光学元件可采用传统的

光刻结合刻蚀的方法制作。刻蚀法,本文设计的 4 台阶浮雕结构的相位分别为 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 。对于掩模板 1 的设计, a_3 和 a_4 归一化 0,即未曝光区域, a_5 和 a_6 归化为 1,即曝光区域;对于掩模板 2 的设计, a_3 和 a_5 归一化为 1,即曝光区域, a_4 和 a_6 归化为 0,即未曝光区域。这样可获取掩模板 1 和掩模板 2 曝光区域和未曝光区域大小和位置的三维数据,进行掩模板的制作。

利用光刻技术将图形转印到涂在基片表面的光刻胶上^[1-12],再进行刻蚀及去胶。图 8 是显微镜下的掩模板图形。基底采用厚度为 1.5 nm 的玻璃,将基片分别放入装有丙酮和无水乙醇溶液的烧杯中,加热至 50 ℃并用超声波清洗 10 min,然后用去离子水冲洗,并用氮气吹干,最后用热板在 105 ℃下干燥。光刻部分在旋涂光刻胶部分,采用 KW-4A 型匀胶机,匀胶部分在低速 1 000 r/min 时间 30 s,高速 3 500 r/min 时间 40 s 的情况下,得到光刻胶的厚度大约在 2 μm 左右,再进行曝光和显影。

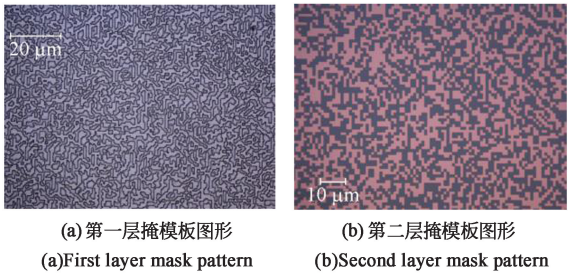


图 8 显微镜下掩模板图形
Fig.8 Mask pattern for microscope

通过调节不同参数来试验达到最好显影图案,严格控制腐蚀时间获取合适的刻蚀深度,图 9 是制作的纯相位型全息光学元件,在一块记录板上,制作了 9 个全息衍射面。

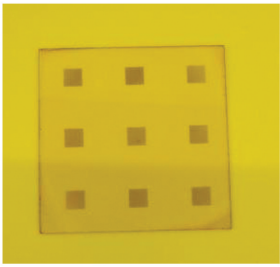
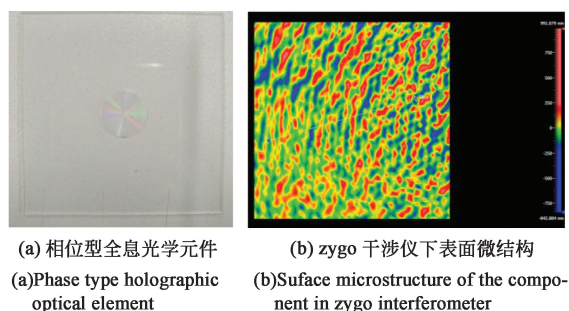


图 9 纯相位型计算全息光学元件
Fig.9 Pure-phase type computer-generated holographic optical element

除了采用传统的光刻及刻蚀方法外,也可利用最近快速发展的单点金刚石车削技术来进行加工。单点金刚石车削通过计算机编程进行精确控制,可实现复杂表面结构的衍射微光学元件的制作。本文根据所设计的相位型全息元件的特点,基底材料选用 PMMA,采用快刀的加工方式,通过电压驱动快刀刀架做快速运动,具有很大的加速度,但快刀运动的幅度有限,目前最大为 $1\ 000\ \mu\text{m}$ 。图 10 为利用单点金刚石车削技术制作的相位型全息元件。



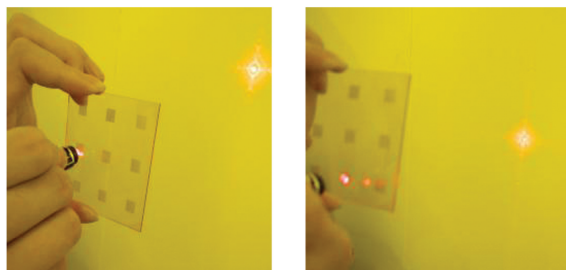
(a) 相位型全息光学元件
(a) Phase type holographic optical element

(b) zygo 干涉仪下表面微结构
(b) Surface microstructure of the component in zygo interferometer

图 10 金刚石车削技术制作的纯相位型计算全息光学元件

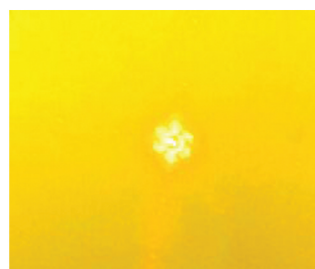
Fig.10 Pure-phase type computer-generated holographic optical element by SPDI

用波长为 $650\ \text{nm}$ 的激光器发出的光直接照射制作的相位型计算全息图,可在全息图的后方观察到衍射图像,图 11 是全息再现图像。零级衍射较大,再现像的效果差,可在再现光路中加入空间滤波器等组件,用获得的平行光照射制作的相位全息图,观察重构图形。如果激光器的带宽过宽,可利用滤光片或者光栅来压窄带宽,使光波长接近理想的工作波长,可提高再现像的质量。



(a) 分划线图形再现图像
(a) Reconstructed image of the reticule

(b) 雪花图形再现图像
(b) Reconstructed image of the snowflake



(c) 雪花图形再现图像的局部放大图

(c) Partial enlarged drawing of the reconstructed image of the snowflake

图 11 全息再现图像

Fig.11 Reconstructed image

6 结 论

本文对纯相位型计算全息图的工作原理和设计方法进行了研究,建立了相位型计算全息元件衍射光波数理模型,研究其衍射场的传播规律、给出了设计方法。所设计的计算全息元件表面相位结构的最小特征尺寸为 $8\ \mu\text{m}$,表面相位结构的最大深度为 $949\ \text{nm}$ 。由于纯相位型计算全息图表面具有凸凹不平的结构,有利于将来采用模压复制的方法批量生产,克服了传统的光学全息元件面临的加工质量稳定性和使用寿命短的缺陷。在前期的试验过程中,采用传统的刻蚀法和单点金刚石车削技术进行这种台阶型轮廓的衍射微光学元件实验样件的制作。本文设计的 4 台阶浮雕结构利用传统的刻蚀法时需两个掩模板进行图形转印和刻蚀过程;针对这种复杂微结构,若采用单点金刚石车削法技术进行单一元件的制作或者模压模具的制作时,可在保持高的衍射效率和能量利用率的情况下,可进一步通过模压复制的方法实现批量生产。本文完成了纯相位型计算全息图的结构设计、实验样件的制作及全息再现实验。传统刻蚀法和单点金刚石车削技术的制作方法验证了设计的可靠性,为研究相位型衍射元件批量化生产及用于智能显示、全息波导等应用中的关键相位型衍射元件的开发打下了理论及实验基础。

参 考 文 献:

- [1] 颜树华. 衍射微光学设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
YAN S H. *Design of Diffractive Micro-Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 黄向阳, 陈惠芬, 应莹同, 等. 一种新的纯位相型计算全息图及其应用 [J]. 光学学报, 1988, 8(2): 162-165.
HUANG X Y, CHEN H F, YING X T, *et al.* A new proposal for phase-only CGH and its application [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, 8(2): 162-165. (in Chinese)
- [4] 陈岩松, 王玉堂, 李秀英, 等. 一种相位型再现元件—相息图 [J]. 中国激光, 1979, 6(10): 28-33.
CHEN Y S, WANG Y T, LI X Y, *et al.* A wavefront reconstructing device-kinoform [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1979, 6(10): 28-33. (in Chinese)
- [5] 沐仁旺, 周进, 刘建宏, 等. 用二元光学技术制作反射式相息图 [J]. 光学学报, 1998, 18(12): 1746-1750.
MU R W, ZHOU J, LIU J H, *et al.* Reflective kinoform fabrication by binary optical technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(12): 1746-1750. (in Chinese)
- [6] 李勇, 王辉, 金洪震. 一种由全息图制作相息图的方法 [J]. 红外与微光, 2005, 35(10): 765-767.
LI Y, WANG H, JIN H Z. A new approach for making kinoform from hologram [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(10): 765-767. (in Chinese)
- [7] 裴闯, 蒋晓瑜, 王加, 等. 一种三维物体相息图的迭代计算方法 [J]. 光子学报, 2013, 42(3): 348-353.
PEI C, JIANG X Y, WANG J, *et al.* An Iterative algorithm for kinoform computation of 3D object [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(3): 348-353. (in Chinese)
- [8] 刘伯岭, 吴丽莹, 张健. 一种用于衍射光元件优化设计的快速算法的研究 [J]. 光学学报, 2007, 27(2): 219-224.
LIU B H, WU L Y, ZHANG J. Fast phases retrieval for diffraction optical devices optimal design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(2): 219-224. (in Chinese)
- [9] 庞辉, 应朝福, 范长江, 等. 用于光束整形的衍射光学元件设计的混合算法 [J]. 光子学报, 2010, 39(6): 977-981.
PANG H, YING C F, FAN C J, *et al.* Design diffractive optical elements for beam shaping with hybrid algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(6): 977-981. (in Chinese)
- [10] ZHANG Y P, ZHANG J Q, LIU Y, *et al.* Research on a fast algorithm of three-dimensional CGH [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(12): 2727-2730.
- [11] 王成伟. 射手威力倍增器-全息衍射瞄准镜 [J]. 现代兵器, 2001(12): 20-21.
WANG C W. Sagittarius power multiplier-Holographic sight [J]. *Modern Weaponry*, 2001(12): 20-21. (in Chinese)
- [12] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
JIN G F, YAN Y B, WU M X, *et al.* *Binary Optics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [13] TANQ F, YAN Y B, JIN G F, *et al.* Continuous-phase diffractive optical element for realizing uniform illumination on the plane nonperpendicular to the optical axis [C]//*Proceedings of SPIE-Gradient Index, Miniature, and Diffractive Optical Systems*. Denver, CO, United States: SPIE, 1999, 3778: 114-119.
- [14] 张巍, 巩岩. 投影光刻离轴照明用衍射光学元件设计 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2081-2086.
ZHANG W, GONG Y. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2081-2086. (in Chinese)
- [15] 石鹏, 刘强, 曹国威, 等. 衍折射设计用于均匀照明的衍射光学器件 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(8): 1165-1169.
SHI P, LIU Q, CAO G W, *et al.* Diffractive-refractive method for design of diffractive optical elements for uniform illumination [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(8): 1165-1169. (in Chinese)
- [16] 蔡晓鸣. 全息图的计算机模拟再现 [J]. 应用激光, 2001, 21(3): 185-187.
CAI X O. Image reproduction of hologram by computer calculation [J]. *Applied Laser*, 2001, 21(3): 185-187. (in Chinese)

- [17] 付胜豪,鲍绪良,王元庆,等.基于衍射光场的全息图计算机生成[J].计算机与现代化,2012(4):171-174,222.
FU S H, BAO X L, WANG Y Q, *et al.* Computer-generated hologram based on diffraction [J]. *Computer and Modernization*, 2012(4): 171-174, 222. (in Chinese)
- [18] 赵付丽,章鹤龄,邢敬婷,等.基于 Matlab 的计算全息图的制作与数字再现的研究[J].应用光学,2009,30(6): 953-957.
ZHAO F L, ZHANG H L, XING J T, *et al.* Realization and digital reconstruction of computer-generated hologram based on Matlab [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(6): 953-957. (in Chinese)

作者简介:张梦妮(1993—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要研究方向为微纳光学。E-mail: zmn032993@163.com

张锦(1966—),女,博士,研究员,主要研究方向为微纳光学技术、先进光学制造、光学精密测量。E-mail: zhangjin@xatu.edu.cn