

消色散光变图像的 二元光学设计与制作方法*

周小红 陈林森 邵洁 魏国军

(教育部现代光学技术重点实验室, 苏州大学信息光学工程研究所, 苏州 215006)

摘 要 提出了一种实现消色散光变图像的二元光学方法. 以不同取向的狭缝光阑作为目标物光场, 采用迭代傅里叶变换算法计算得到具有定向衍射特性的二元位相结构, 并作为光变图像的微结构. 面向不同图形结构的光变图像, 给出了两种不同的数据方案. 利用自行研制的激光直写系统以逐图形方式和矢量化直写工作方式分别光刻不同结构的光变图像, 位相结构的线宽为 $2\ \mu\text{m}$. 实验结果表明, 定向衍射二元光学位相结构具有消色散特征, 且适合于热压复制工艺, 为制造消色散光变图像提供了一种新方法.

关键词 二元光学; 光变图像; 激光直写; 消色散

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A

0 引言

光学可变图像(Optical Variable Device, OVD)作为先进的光学防伪技术, 广泛应用于货币、签证、ID卡、绝密文件以及包装材料等物理载体上. 目前, 光变图像主要是基于高空频衍射光栅的定向衍射效应来实现的, OVD由不同取向、不同空频的光栅元组成, 在白光照明下, 产生离轴彩虹效果. 但在很多应用场合, 彩色会成为不利因素, 因此, 如何实现消色散光变图像, 成为一个行业发展中研究热点^[1].

原理上, 要实现非彩色光变图像, 首先要获得实现消色散的光学方法. 一种实现消色散光变图像的方案是全息记录定向散斑结构^[2], 但是, 该方案产生条形散斑的颗粒度很大, 同时需要图形掩膜, 不利于精密光变图像的制作. 也有采用低色散本领的低频光栅或非标准衍射光栅结构^[3~5]设计 OVD, 在远场观察时具有白光效果, 非标准光栅包括闪耀光栅、不同浮雕深度结构以及闪耀光栅与正弦型浮雕垂直叠加结构. 采用低空频光栅制作光变图像的问题是, 空频太低导致条纹的占空比小, 不利于光变图像浮雕结构的复制, 而随着空频的增大, 图像的色散也增大; 非标准衍射光栅的微结构制作工艺复杂. 电子束(e-beam)和激光直写(LDW)^[6~11]是两种主要的精密图形的制作方法, 前者刻蚀的分辨率高, 但设备投资大, 设计和制作费用昂贵, 制作时间长; 激光直写是一种相对快捷的掩膜生成方法, 在用来制作线结构图形时, 具有制作工艺简单、速度快、加工成本低和面积大的优点.

本文提出采用二元光学方法设计具有条形远场衍射的位相结构, 这种位相结构实质上是一种二元整形器件. 用不同取向位相结构来作为光变图像的基元图形, 可实现消色散光变图像. 散斑结构直接由迭代傅里叶变换算法运算获得, 其空频和取向随目标物狭缝的取向和尺寸的不同而改变, 与传统的散斑记录方法相比, 更方便、灵活. 利用自行研制的激光直写系统光刻具有散斑微结构的光变图像, 无需掩模, 最小线宽达到 $2\ \mu\text{m}$. 文中给出了不同光变图像的设计与制作方法, 并给出了实验结果.

1 消色散结构的二元光学设计方法

二元整形元件的算法实质是已知输入光场和输出光场, 求解二元位相分布问题. 目标振幅分布为 $\text{rect}(\frac{x}{2a})\text{rand}(x, y)$, $\text{rand}()$ 表示随机分布函数. 通过 20~40 次的迭代计算^[12~15]后得到具有两位相台阶的二元位相角分布 $\phi(u, v)$, 位相角为 $\{0, \pi\}$, 再现光场 $R(x, y)$ 可表示为

$$R(x, y) = F\{\exp[i\phi(u, v)]\} = \text{rect}(\frac{x}{2a})\text{rand}(x, y) \quad (1)$$

式中, $F\{\}$ 表示傅里叶变换. 图 1(a)是一种狭缝光

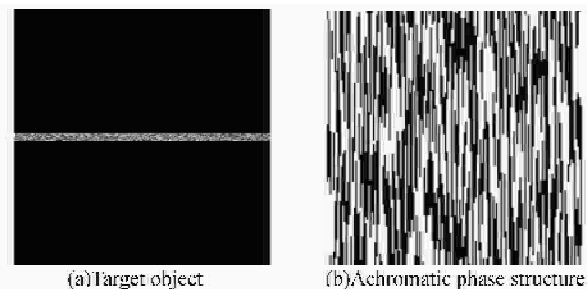


图 1 消色散位相结构的设计

Fig. 1 Designing of achromatic phase structure

* 国家自然科学基金(10474070)资助

Tel: 0512-65112661 Email: xhzhou@suda.edu.cn

收稿日期: 2005-12-15

场,作为已知输出光场 $F(x, y)$,来逆向求解出二元位相 $\phi(u, v)$,如图 1(b),其分布为一种条形的、具有定向衍射特点的位相结构.若将该分布直写到光刻胶上,其浮雕微结构的透过率为

$$t(u, v) = \exp [i\phi(u, v)] \quad (2)$$

一般地,二元光学元件的最小位相单元尺寸大于使用波长,因此,采用标量波理论来计算元件的衍射效率,一级衍射效率的定义为

$$\text{Diff} = \frac{\sum_{(x, y) \in \Omega} I_r(x, y)}{\sum_x \sum_y I_r(x, y)} \quad (3)$$

式(3)中的分子是再现目标图像内 Ω 的光强,分母是整个再现光场的光强; M, N 分别表示整个再现光场的长和宽.

白光照明时将再现光场 $R(x, y)$ 表示为 λ 的函数 $R(x, y, \lambda)$,在反射光方向观察的光强分布可表示为

$$I = \int |R(x, y, \lambda)|^2 d\lambda \quad (4)$$

可见光波长 λ 取值为 400 nm~760 nm,用 Matlab 软件计算,式(4)分布如图 2,可以看出不同波长的衍射光被限制在一狭长范围.虽然,同一个位相结构对不同波长光的衍射效率不同,但衍射光仍表现出白色(消色散).若以定向衍射二元位相结构作为 OVD 的组成部分,这样的 OVD 便有消色散特征.

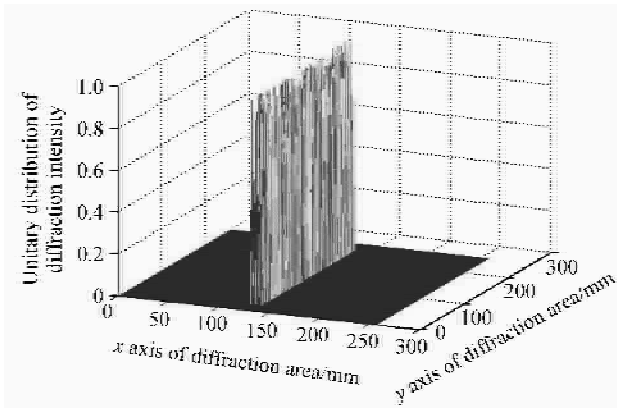


图 2 可见光区的衍射光强分布

Fig. 2 Diffractive wave distribution in visible spectrum

2 消色散 OVD 的实现方案

一般地,OVD 数据可表示为 $f(x, y, \phi, \Lambda), x, y$ 表示像素光栅元的空间坐标, ϕ 代表光栅取向, Λ 表示光栅常量.具有彩虹效果的光变图像是以高空频的光栅单元作为像素单元的.采用定向散斑位相结构单元替代高空频光栅单元,作为 OVD 的像素元.作为举例,规定 OVD 像素元的取向 ϕ 为 $-89^\circ \sim 90^\circ$,每 5° 改变一次,共 36 种单元取向,不同取向的位相单元顺序排列成 6×6 的二维阵列,如图 3.位相单元的取向和空频可由狭缝的取向和尺寸来改变,由计算机设计不同空频、不同取向的位相结构,

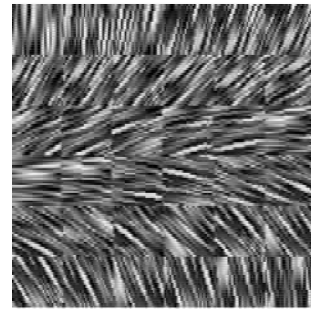


图 3 数据方案一

Fig. 3 Scheme 1

生成一个模板库.根据数据中的 ϕ, Λ 值从模板库中调用相应的位相单元输出到空间光调制器上,经过精缩投影物镜投影到光刻胶面.这种方案原则上可以设计、制作各种类型的光变图像.但是,若制作的 OVD 在某一区域内的像素元的 ϕ, Λ 相同(文中称为 OVD 的面阵单元)时,则需重复调用相同取向的位相结构.设像素单元的大小为 $p \times q$,若对于 $M \times N$ 的面阵图形,需重复调用同一取向的位相单元排列成 $(M/p) \times (N/q)$ 阵列.设位相单元的透过率函数为 $t_0(u_0, v_0)$,则由位相单元阵列组成的面状图形的透过率 $t(u_0, v_0)$ 为

$$t(u_0, v_0) = t_0(u_0, v_0) * \sum_{m=1n=1}^M \sum_{n=1}^N \delta(u_0 - mp, v_0 - nq) \quad (5)$$

式中,“*”表示卷积,其衍射光场的复振幅分布为

$$T(x, y) = T_0(x, y) \sum_{m=1n=1}^M \sum_{n=1}^N \exp [-j2\pi(mx p + ny q)] = T_0(x, y) \exp [-j\pi(M+1)x p + (N+1)y q] \frac{\sin M\pi x p}{\sin \pi x p} \frac{\sin N\pi y q}{\sin \pi y q} \quad (6)$$

衍射光场的强度分布为

$$I(x, y) = |T_0(x, y)|^2 \left| \frac{\sin M\pi x p}{\sin \pi x p} \right|^2 \left| \frac{\sin N\pi y q}{\sin \pi y q} \right|^2 \quad (7)$$

式(7)表明,相同取向位相单元阵列的衍射光强在相互垂直的方向上被 sinc 函数调制,使得远场衍射光场干涉形成明暗相间的二维条纹,降低了狭缝光场的光强,影响了 OVD 的光变效果.

对于面阵 OVD,提出第二种数据方案:根据面阵单元的形状和尺寸来设计对应的定向衍射位相结构.若面单元为规则图形,位相结构尺寸等于子图像面单元尺寸,如图 4(a),是根据 OVD 上一小面积设计的定向衍射位相结构,该结构再现的狭缝形光带较强,如图 4(b),一级衍射效率为 38%.若面阵单元为不规则图形,定向衍射位相结构的长、宽应分别等于面单元的横向宽度和纵向宽度,再根据面单元形状截取相应的散斑分布,如图 4(c),其衍射光强分布如图 4(d).

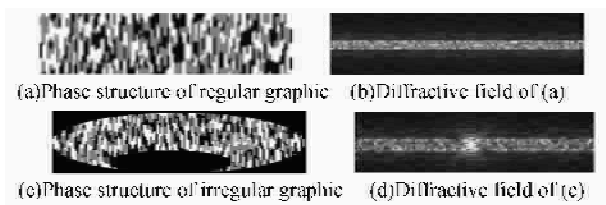


图 4 数据方案二

Fig. 4 Scheme 2

以上介绍了两种实现 OVD 数据方案, 方案(1)适合于像素元角度变化连续的点阵 OVD, 方案(2)适合面阵 OVD. 对于复杂结构的 OVD, 两种数据方案可结合使用.

3 实验制作与讨论

采用自行研制的 SVG-LDW04 激光直写系统来制作光变图像, 系统光学结构如图 5, 在光刻胶板上的最小光点分辨率为 $2 \mu\text{m}$. 对于第一种数据结构, 采用系统的逐图形曝光工作方式. 光刻时根据数据中的 ϕ 、 Δ 值调用预先设计的位相单元, 并输出到液晶空间光调制器(像素尺寸 $25.9 \mu\text{m}$)上, 经过精缩投影物镜投影到光刻胶面进行逐图形曝光. 第二种数据方案, 采用系统的矢量化直写工作方式, 平台在多轴控制卡的控制下可进行任意方向的矢量化运行. 根据数据中的 ϕ 、 Δ 值将预先设计的位相结构图像处理成一种矢量化的数据结构, 即在扫描线上连续相同位相分布仅取两端点的坐标, 然后将矢量化数据串行输出到空间光调制器上, 由于是两阶段位相结构, 这里空间光调制器的作用相当于一个光开关. 从而, 激光直写系统可光刻各种取向设计的两阶段位相结构, 最终形成复杂分布的光变图形.

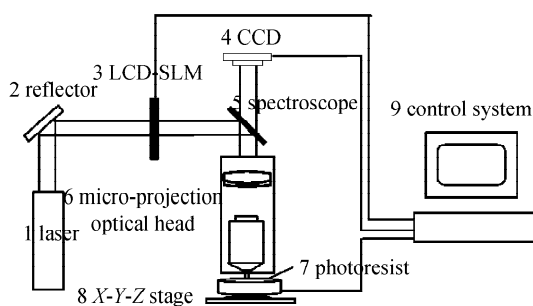


图 5 SVG-LDW04 系统结构图

Fig. 5 Illustration of SVG-LDW04

图 6(a) 的图像在小区域内的像素元角度连续变化, 因此采用数据方案一, 以逐图形曝光方式光刻. 光刻后电铸到金属镍板上的照片如图 6(b), 其结果表明, 该方案制作的光变图像具有消色散效果.

图 7(a) 是基于二元光学方法设计的散斑结构, 基于数据方案二, 以矢量化直写方式光刻的具有消色散特征的 OVD 的照片. 该图像由四种不同取向的面阵单元组成. 当在 650 nm 单色光照明下, 该图

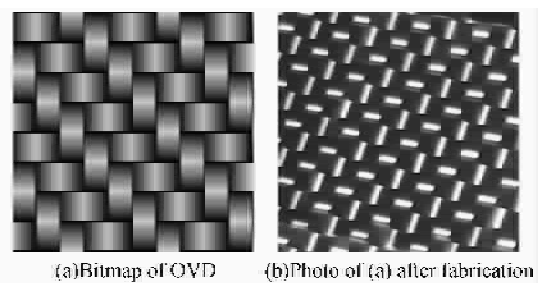


图 6 角度连续变化的点阵 OVD 实例

Fig. 6 Fabricated sample for a OVD with scheme 1

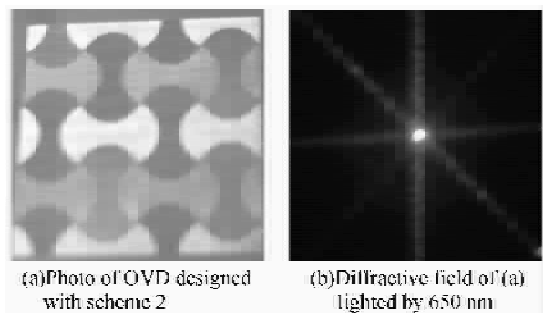


图 7 面阵 OVD 制作实例及衍射光场分布

Fig. 7 OVD sample designed with scheme 2

像的衍射光场分布如图 7(b), 表明, 四种不同取向的散斑结构再现了四个不同方向的狭缝光场, 结合式(4)和图 2, 白光照明时, 不同色光的衍射光场被限制在狭缝内, 进一步解释了图 7(a) 的消色散特征.

OVD 制作过程包括光刻、电铸、热压等工序. 实验证明, 定向散斑微结构比占空比较小的低频光栅浮雕结构更适合热压工艺.

4 结论

本文基于二元光学设计方法实现了消色散微光变图像. 用迭代傅里叶变换算法计算得到的具有定向衍射特性的二元位相结构作为光变图像的像素元, 制作的光变图像具有消色差特性. 面向 OVD 的不同结构, 提出了两种不同的数据方案, 有效提高了 OVD 的亮度. 利用自行研制的激光直写系统分别以逐图形和矢量化工作方式光刻直写不同结构的微光变图像, 位相结构最小线宽为 $2 \mu\text{m}$. 实验结果表明, 基于定向衍射二元光学位相结构的光变图像具有消色散视觉效果, 且适合于热压复制工艺, 为制造消色差微光变图像提供了一种有效的方法.

参考文献

- 1 Steenblik R A, Hurt M J, Knotts M E. Advantages of micro-optics over hologram for authentication. *SPIE*, 2002, **4677**: 215~226
- 2 范诚. 数字散斑全息图的制作方法和装置. 中国专利, CN200410022193. 7. 2005. 1~12
Fan C. China patent, CN200410022193. 7. 2005. 01~12
- 3 Andreas Schilling, Rene Staub, Tompkin W

- R. Achromatic features for optically variable devices. *SPIE*, 2002, **4677**: 238~46
- 4 Rene Staub, Tompkin W R. Non-standard diffraction structures for OVDs. *SPIE*, 1998, **3314**: 194~202
- 5 Rosolen G C. Optically variable devices fabricated by electron beam lithography. *SPIE*, 2004, **5276**: 318~323
- 6 Kanti Jain. Lithography and photoablation systems in Microelectronics and optoelectronics; importance of laser beam shaping in system designs. *SPIE*, 2002, **4770**: 1~12
- 7 Smuk A Y, Lawandy N M. Direct laser writing of diffractive optics in glass. *Opt Lett*, 1997, **22**(13): 1030~1032
- 8 Poleshchuk A G, Churin E G, Koronkevich V P, *et al.* Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure. *Appl Opt*, 1999, **38**(8): 1295~1301
- 9 李凤有, 谢永军, 孙强, 等. 激光直写光刻中线条轮廓的分析. 光子学报, 2004, **33**(2): 9~12
Li F Y, Xie Y J, Sun Q, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 9~12
- 10 陈林森, 解剑锋, 沈雁. 基于 SLM 的三维图像激光光刻系统的研制. 激光与红外, 2003, **33**(5): 367~370
Chen L S, Xie J F, Shen Y. *Laser and Infrared*, 2003, **33**(5): 367~370
- 11 陈林森, 邵洁, 王雪辉, 等. 一种二元整形元件激光直写方法的实验研究. 光子学报, 2005, **34**(3): 27~30
Chen L S, Shao J, Wang X H, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 27~30
- 12 Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures. *Optik*, 1972, **35**: 237~246
- 13 Johansson M, Bengtsson J. Robust design method for highly efficient beam-shaping diffractive optical elements using an iterative-Fourier-transform algorithm with soft operations. *J of Modern Optics*, 2000, **47**(8): 1385~1397
- 14 赫尔齐克 H P 主编, 周海宪, 王永年, 等译. 微光学元件、系统和应用. 北京: 国防工业出版社, 2002. 12~13
Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 12~13
- 15 陈林森, 周小红, 邵洁. 一种基于二元位相加密的大信息量数字全息水印. 光子学报, 2005, **34**(4): 138~142
Chen L S, Zhou X H, Shao J. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 138~142

Design and fabrication for Achromatic Optical Variable Device

Zhou Xiaohong, Chen Linsen, Shao Jie, Wei Guojun

Key laboratory of modern optical technology, Institute of information optical Engineering, Suzhou University, Suzhou 215006

Received date: 2005-12-15

Abstract The method of designing binary optical element (BOE) is proposed to realize Achromatic Optical Variable Device (AOVD). The distribution of confined slot was used as target object and then the binary phase structure was calculated by Iterative Fourier Algorithm (IFTA). The structure had directional diffractive character and acted as the cell of AOVD. Two different datum schemes were adopted to design AOVDs of different configurations. AOVD was fabricated by SVG-LDW04 lithography system in pattern-by-pattern mode and vector writing mode respectively. The minimum width of phase structure of AVOD is 2 μm and the photos of fabricated AVODs were also given. The results show that the directional diffractive binary phase structure was achromatic and apt for hot embossing and offers a new method for AVOD.

Keywords Binary optics; Optical variable device; Photolithography; Achromatic



Zhou Xiaohong was born in July of 1980. She received B. S. Degree in 2002 and Master degree in 2005 from Soochow University. Now she works in the Institute of Information Optical Engineering of Soochow University. Her research interests are in digital image processing optical information processing and binary optics.