

文章编号: 0253-2239(2007)10-1788-5

误差扩散法设计用于惯性约束聚变驱动器的 色分离光栅-光束采样光栅集成元件

张怡霄 姚 欣 高福华 郭永康

(四川大学物理系, 成都 610064)

摘要: 针对多次曝光法制作集成衍射光学元件时存在的加工制作复杂, 会引入较大的对位误差等问题, 基于计算全息中的误差扩散编码原理及部分相干成像理论, 提出采用误差扩散编码方法来设计用于制作浮雕结构集成元件的编码掩模的新方法。给出了利用误差扩散法设计的色分离光栅-光束采样光栅(CSG-BSG)集成元件编码掩模, 模拟计算了经部分相干成像系统后的空间像光强分布, 并与理想的集成元件面形进行了比较。结果表明, 校正后均方差为 7.5%, 体积偏差为 10.2%。

关键词: 集成光学; 误差扩散; 灰阶编码; 色分离光栅(CSG); 光束采样光栅(BSG); 惯性约束聚变驱动器
中图分类号: TL632+.1 文献标识码: A

Design of Combined Color-Separation Grating and Beam-Sampling Grating Element Used in Inertial Confinement Fusion Driver with Error-Diffusion Method

Zhang Yixiao Yao Xin Gao Fuhua Guo Yongkang

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

Abstract: The multiple exposure method has been proposed to fabricate combined diffractive optical element, but the multiple etch processing is complex and large alignment error will be introduced. According to error-diffusion method in computer-generated hologram (CGH) and partial coherent imaging theory, a new method to design coding mask of profile-combined element with error-diffusion method is presented. The designed coding mask for color-separation grating and beam-sampling grating (CSG-BSG) combined optical element with error-diffusion method is illustrated, and the intensity distribution of the spatial image in partial coherent imaging system is simulated, compared with ideal combined element relief. It shows that mean-square error is 7.5% and volume error is 10.2% after correction.

Key words: integrated optics; error diffusion; gray-tone coding; color-separation grating; beam-sampling grating (BSG); inertial confinement fusion driver

1 引 言

衍射光学元件(DOE)在惯性约束核聚变(ICF)激光驱动器的终端光学系统中有着重要的应用^[1~4]。由于惯性约束聚变驱动系统中的激光束具有非常高的能量和峰值功率, 强激光束在通过光学元件时, 会与元件介质相互作用产生自聚焦等非线性效应; 此外, 系统中使用的光学元件的总数量也很大, 每增加

一个反射面其反射损失的能量都相当大。因此, 惯性约束聚变驱动器要求尽量减少系统中特别是终端光学系统中的元件数和元件厚度, 从而减小反射损失以及非线性相位延迟。由于衍射光学元件具有易于集成的优点, 可通过将终端光学系统中实现不同功能的衍射光学元件集成到一个元件上, 来优化系统的结构和性能。美国里弗莫尔实验室(LLNL)^[1]提出采用多

* 国家自然科学基金-中国工程物理研究院联合基金(10376019)资助课题。

作者简介: 张怡霄(1975—), 女, 四川三台人, 讲师, 博士研究生, 主要从事信息光学和衍射光学元件等方面的研究。

E-mail: zyxscu@263.net

导师简介: 郭永康(1938—), 男, 四川宜宾人, 教授, 博士生导师, 主要从事衍射光学、光子技术等方面的研究。

E-mail: guoyongkang@263.net

收稿日期: 2006-12-30; 收到修改稿日期: 2007-03-05

次曝光的方法将光束采样光栅(BSG)和色分离光栅(CSG)合成制作在一个石英基片上来减少系统中的元件数,然而因光束采样光栅和色分离光栅在横向和纵向尺度上相差太大,采用多次曝光的方法制作集成结构,需分别完成两个不兼容的工艺过程,加工制作复杂,而且制作过程中需进行多次曝光蚀刻,增大了对位误差。另外当刻蚀色分离光栅台阶时会造成原有光束采样光栅刻槽深度变浅槽形变坏。

针对现有的多次曝光集成方法在加工制作上存在的问题,考虑采用灰阶编码掩模法,通过一次曝光来制作集成元件。相比于已有的制作三维连续浮雕结构微光学元件的方法(如抗蚀剂热熔法、直写法、灰阶掩模法等),灰阶编码掩模法^[5,6]具有很多优点。已报导的灰阶编码掩模法以及在其基础之上发展起来的多自由度灰阶编码掩模法^[6]均主要采用基于单元的罗曼 III 型编码方法,因此仍然存在掩模制作时间长、编码数据量较大、受电子束直写分辨力的限制而难以制作面形细腻的图形等缺点。

误差扩散法在信号处理和计算全息(CGH)等领域已得到广泛的应用^[7,8],其扩散过程能够有效地减小由非线性系统产生的信号误差。R. Hauck 等^[7]将此方法用于制作振幅型计算全息,S. Weissbach 等^[9]将此方法从实数扩展到复数,并用于相息图的量化和编码。受误差扩散编码制作计算全息图的启示,本文提出了采用误差扩散编码方法来设计用于制作色分离光栅-光束采样光栅集成元件的编码掩模的新方法。利用基于脉冲密度调制的误差扩散法来编码灰阶掩模,具有量化效果好、衍射效率高、制作文件小、通用性好等优点,可以改进现有灰阶编码方法中存在的局限,提高编码精度,在制作高质量大面积连续浮雕的微光学元件方面有很好的应用前景。利用设计出的掩模,仅需一次曝光即可制作出集成元件,大大降低了集成元件的制作难度,同时也避免了多次套刻引入的对位误差。

2 原 理

误差扩散的基本思想^[7]是将原始数据矩阵中的第一个像素点的值与设定的阈值相比较,若大于阈值则赋值为 1,反之为 0。这个过程中产生的误差按一定的权重向相邻的像素点扩散,下一个像素点加上误差后再与阈值比较,重复前面的过程,最终得到二值化的编码数据。

2.1 误差扩散法编码计算全息图

计算全息中将数据进行二值化处理的方法通常

有三种:脉冲宽度调制(PWM);脉冲密度调制(PDM);脉冲宽度调制和脉冲密度调制同时使用。与基于脉冲宽度和位置调制的罗曼 III 型编码方法不同,误差扩散法是基于脉冲密度调制的对像素点的直接二元编码方法。与脉冲宽度调制的编码方法相比,脉冲密度调制的编码方法在输出设备的每一个可分辨像素点处计算全息图的透射率,进行逐点的二值化,因此能够更充分地利用输出设备的空间带宽积,具有更高的编码精度^[7]。

采用误差扩散法制作傅里叶变换计算全息图的一般步骤为^[8]:

1) 将待编码的实值物函数 $o(x, y)$ 与一随机相位函数 $\varphi(x, y)$ 相乘构成输入复函数 $u(x, y)$:

$$u(x, y) = o(x, y) \exp[i\varphi(x, y)], \quad (1)$$

在 $|x| \geq \Delta x/2$ 和 $|y| \geq \Delta y/2$ 的区域, $o(x, y) = 0$ 。

2) 将矩阵大小为 $[\Delta x, \Delta y]$ 的物函数离轴放入一大矩阵 $[\Delta X, \Delta Y]$ 中,以保证再现像的 0、+1、-1 级不发生混叠。

3) 对放入物函数后的大矩阵 $[\Delta X, \Delta Y]$ 作傅里叶变换得到 $U(\mu, \nu)$, 忽略其虚部,加入偏置项(保证所有的值为非负)得

$$H(\mu, \nu) = |U(\mu, \nu)| \times \cos[2\pi(x_s \mu + y_s \nu) + \Phi(\mu, \nu)] + B, \quad (2)$$

式中 B 为偏置量,一般取实数; (x_s, y_s) 为小矩阵 $[\Delta x, \Delta y]$ 中心到扩展矩阵 $[\Delta X, \Delta Y]$ 中心的偏移量。

4) 对非负的 $H(\mu, \nu)$ 用误差扩散法进行二值化编码,得到编码图形。

5) 经过逆傅里叶变换再现计算全息图。

步骤 4) 中用误差扩散法进行编码时,可根据实际情况(例如物函数离轴的位置),采用不同的误差扩散矩阵,以获得最佳的再现效果^[7]。

2.2 色分离光栅和光束采样光栅

惯性约束聚变系统中通常需要分离的三种谐波为:1053 nm (1ω), 527 nm (2ω) 和 351 nm (3ω)。根据惯性约束聚变物理实验对谐波分离的要求,色分离光栅设计为三台阶周期光栅(如图 1 所示)。经色分离光栅后,三倍频光继续沿原光路传播,而绝大部分的基频和二倍频光将发生偏折,被闪耀到 ± 1

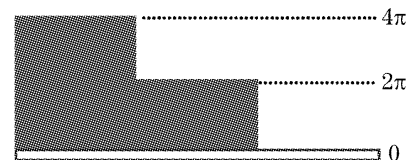


图 1 谐波分离器在一周期内的结构

Fig. 1 Color separation grating steps in one period

级以至更高的衍射级次上,只有极少部分的光继续沿原光路传播,从而实现三种谐波的空间分离。

在惯性约束聚变激光系统中,激光参量的在线诊断是整个装置总体集成实验的“眼睛”,它为每一个基准实验提供准确的实验数据,为各分系统提供激光参量测量结果,同时也为全面、仔细研究强激光系统的总体性能提供技术保证。在目前的惯性约束聚变驱动器中,主要采用光束采样光栅来实现对 3ω 光的取样^[1,4]。光束采样光栅的变周期光栅结构,与离轴全息波带片结构相同^[4,10],它由平面波与球面波干涉形成。当平行光入射到这种变周期的光栅结构上时,能

使取样光束从主光路中分离出来并聚焦。

2.3 误差扩散法设计集成元件

基于误差扩散编码制作计算全息图的原理,本文利用误差扩散编码方法设计编码掩模来制作色分离光栅-光束采样光栅集成元件,其过程如图 2 所示。首先按照误差扩散法制作傅里叶变换计算全息图的方法,生成集成元件的离轴傅里叶变换计算全息图,此即为二元编码掩模,可采用电子束直写或激光直写来制作。将其+1 级再现像作为部分相干成像系统的输入灰度掩模,经曝光、显影后可生成具有连续面型的抗蚀剂浮雕轮廓。

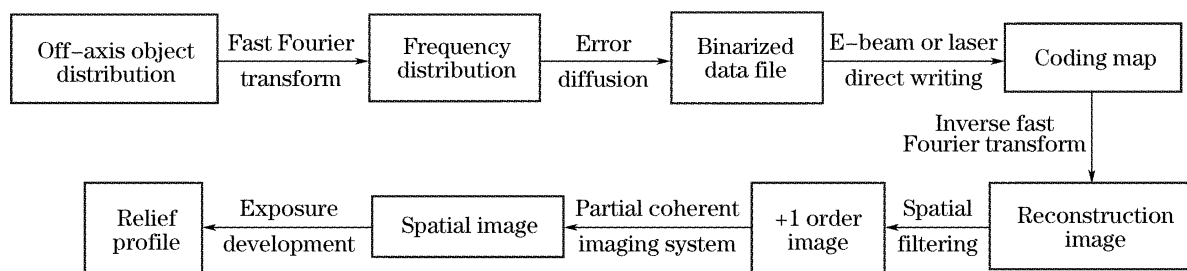


图 2 用误差扩散编码方法制作集成元件过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fabricating combined element with error diffusion coding method

由于投影光刻成像系统通常采用部分相干光照明,因此在光刻的空间像模拟计算中,部分相干成像标量理论被广泛采用。部分相干成像过程对光强和振幅的传递都是非线性的,但是对互强度的传递是线性的,因此不能用传统的调制传递函数(MTF)来描述。本文采用霍普金斯(Hopkins)公式来计算部分相干成像系统的空间像光强分布,即把有效光源看成是由许多相互独立的点光源组成,像面上的光强分布可看成是有效光源上各个点光源对像面光强的贡献和一个与光源面上的光强度成正比的权重因子相乘后积分叠加。

根据霍普金斯公式,像面强度分布可表示为

$$I(x_i, y_i) = \iiint U(f, g)U^*(f', g')T(f, g, f', g')\exp\{2\pi i[(f - f')x_i + (g - g')y_i]\}dfdgdf'dg', \quad (3)$$

或

$$I(x_i, y_i) = \iiint G(\mu, \nu)\exp[2\pi i(\mu x_i + \nu y_i)]d\mu d\nu, \quad (4)$$

式中

$$G(\mu, \nu) = \iint U(f, g)U^*(f - \mu, g - \nu)T(f, g; \mu, \nu)dfdg \quad (5)$$

为像面光强分布的频谱, $U(f, g)$ 为物振幅频谱,均采用归一化坐标和归一化频率; $T(f, g; \mu, \nu)$ 为此时的交叉透射系数:

$$T(f, g; \mu, \nu) = \iint I_{\text{eff}}(x, y)L(x + f, y + g)L^*(x + f - \mu, y + g - \nu)dxdy. \quad (6)$$

3 模拟结果

图 3 为理想的色分离光栅-光束采样光栅集成元件轮廓图。我们采用文献[7]提出的误差扩散矩阵对此集成元件进行了误差扩散编码,得到如图 4 所示的二元计算全息图。其+1 级再现像如图 5(a)所示。将此+1 级再现像作为部分相干成像系统的输入灰度掩模,可计算得到经过部分相干成像系统后抗蚀剂表面的空间像光强分布,如图 6(a)实线所示。

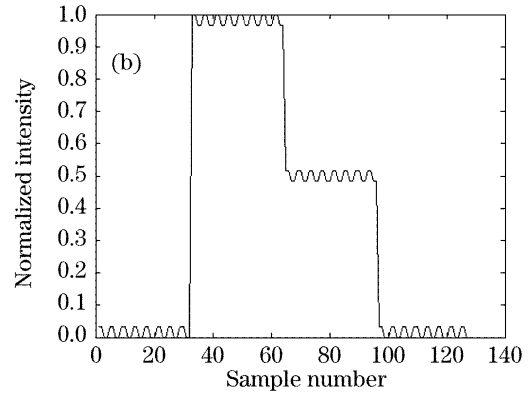
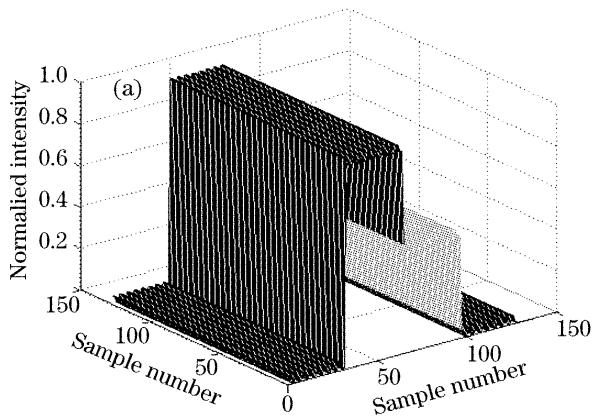


图 3 理想的色分离光栅-光束采样光栅集成元件轮廓。(a) 三维轮廓图, (b) 中心剖面图

Fig. 3 Desired profile of combined color separation grating-beam sampling grating element. (a) three-dimensional profile, (b) cross-section profile

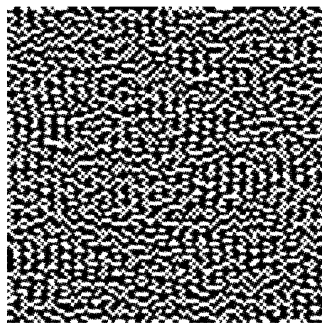


图 4 编码掩模(局部放大)

Fig. 4 Coding mask (a magnified portion)

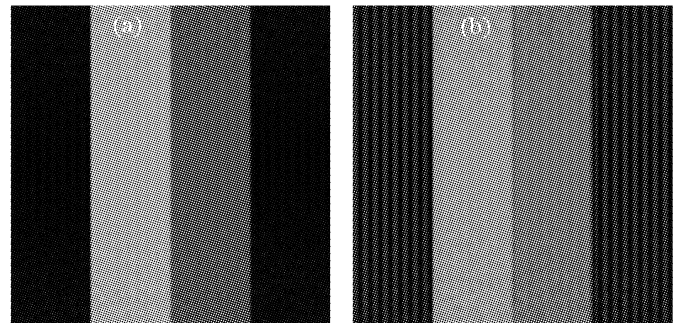


图 5 计算全息图的+1级再现像。(a)校正前,(b)校正后
Fig. 5 +1 order reconstruction image of computer-generated hologram. (a) Before correction, (b) after correction

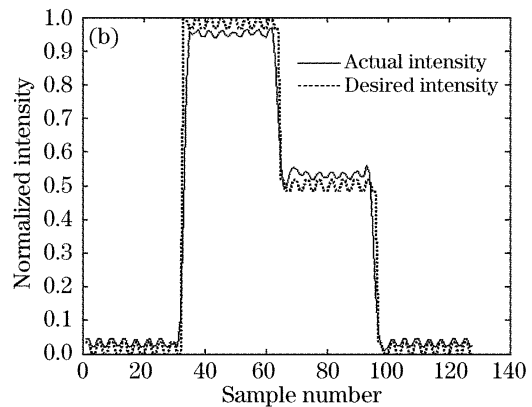
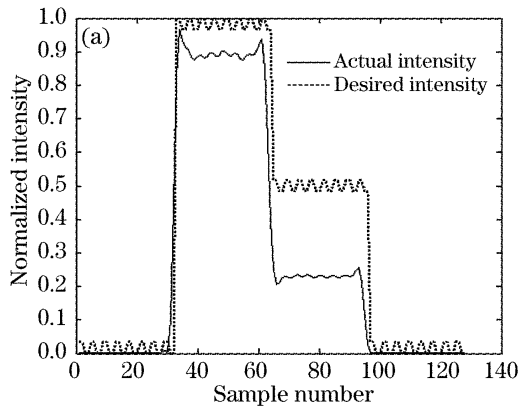


图 6 经过部分相干成像系统后抗蚀剂表面的空间像光强分布剖面图。(a)校正前,(b)校正后

Fig. 6 Intensity distribution of the spatial image after passing through the partial coherent imaging system.

(a) Before correction, (b) after correction

由于输入物体经过部分相干成像系统后,空间像光强分布将发生畸变,与理想的空间像分布存在误差。利用灰阶编码掩模所具有的可进行预畸变校正的优点,可对掩模进行预校正,校正后得到的+1级再现像如图 5(b)所示。其经过部分相干成像系统后抗蚀剂表面的空间像光强分布如图 6(b)实线所示。

本文以均方差和体积偏差为依据对掩模校正的效果进行了分析。均方差

$$R = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (A - A_i)^2}{n}}, \quad (7)$$

式中 A 为理想面型数据, A_i 为经过部分相干成像系统后的模拟结果, n 为抽样点数 ($n = 128$)。经计算,校正前 $R = 15.7\%$,校正后 $R = 7.5\%$ 。体积偏差

$$E = \frac{\Delta C_+ + \Delta C_-}{C}, \quad (8)$$

式中 C 为设定的理想面型体积, ΔC_+ 为因畸变而比原设计体积多出的体积, ΔC_- 为因畸变而比原设计

体积少的体积。经计算,校正前 $E=28.1\%$,校正后 $E=10.2\%$ 。

4 结 论

将计算全息中的误差扩散编码方法引入到灰阶编码掩模的设计中,对色分离光栅-光束采样光栅集成元件进行了模拟计算。采用此方法进行设计,在提高编码精度的同时,仅需一次曝光即可制作出集成元件,大大降低了现有的多次曝光法制作集成元件的难度,同时也避免了多次套刻引入的对位误差。利用部分相干成像理论对成像过程进行了模拟,利用灰阶编码掩模特有的可对编码图形进行预校正的优点,对编码掩模进行了优化,得到校正后的均方差为 7.5% ,体积偏差为 10.2% 。

参 考 文 献

- 1 J. A. Britten, M. C. Rushford, L. Auyang *et al.*. Diffractive optics for the NIF [R]. UCRL-LR-105821-99-2, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1999. 125~134
- 2 T. H. Bett, R. M. Stevenson, M. R. Taghizadeh *et al.*. Diffractive optics development for application on high power solid state lasers[C]. *Proc. SPIE*, 1997, **2633**: 129~140
- 3 Su Jingqin, Du Jinglei, Yao Jun *et al.*. Binary optical element for separating harmonic waves in ICF driver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 405~409 (in Chinese)
粟敬钦,杜惊雷,姚 军 等. 实现惯性约束聚变驱动器谐波分离的二元光学元件研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 405~409
- 4 T. H. Bett, I. C. Smith. Diffractive beam samplers for large aperture beam diagnostics[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3492**: 445~452
- 5 K. Reimer, W. Henke, H. J. Quenzer. One-level gray-tone design mask data preparation and pattern transfer [J]. *Microelectronic Engineering*, 1996, **30**(1~4): 559~562
- 6 Su Jingqin, Yao Jun, Du Jinglei *et al.*. Coding gray-tone mask for fabrication of microoptical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(1): 97~100 (in Chinese)
粟敬钦,姚 军,杜惊雷 等. 灰阶编码掩模制作微光学元件[J]. *光学学报*, 2001, **21**(1): 97~100
- 7 R. Hauck, O. Bryngdahl. Computer-generated holograms with pulse-density modulation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1984, **1**(1): 5~10
- 8 Reiner Eschbach. Comparison of error diffusion method for computer-generated holograms[J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(26): 3702~3710
- 9 S. Weissbach, F. Wyrowski. Error diffusion procedure; theory and applications is optical signal processing [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(14): 2518~2534
- 10 Gao Fuhua, Zeng Yangsu, Xie Shiwei *et al.*. Using ebeam-direct writing method to fabricate low-efficiency beam sampling grating [J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(2): 134~136 (in Chinese)
高福华,曾阳素,谢世伟 等. 电子束直写制作低效取样光栅[J]. *中国激光*, 2003, **30**(2): 134~136