

文章编号:1002-2082(2010)01-0047-04

# 数字化光学元件中黑栅效应的研究

荆汝宏, 黄子强

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 计算机光学元件是纯相位元件, 能够产生任意形状的波面分布, 但存在着加工工艺过于复杂的缺点。目前出现了用数字化元件实现计算机光学元件的方法, 在这些方法中经常要面临黑栅效应的干扰。利用傅里叶光学理论研究了黑栅效应对具体元件的影响程度, 找出了影响黑栅效应强弱的因素, 并用MATLAB软件进行了模拟。模拟结果表明: 减小黑栅的宽度可使光能量向接收屏中央集中, 有效降低黑栅效应的干扰。

**关键词:** 激光束整形; 黑栅效应; 标量衍射理论

中图分类号: TN202; O438.2

文献标志码: A

## Black-matrix effect in digitized optical elements

JING Ru-hong, HUANG Zi-qiang

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic  
Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** The computer optical elements (COE) are pure-phased elements, which can shape the laser beam to arbitrary shape, but is very complicated in their processing technic. Now some methods to realize the COE by digitized elements turn up, but the interference from the black-matrix effect is non-negligible when using these methods. The influence of the black-matrix effect on the certain elements was researched by means of the Fourier optics theory, the factors to influence the black-matrix effect were found out and the corresponding simulation was carried out with MATLAB. The result shows that the energy concentrats to the center of the receiving screen when reducing the width of the black-matrix, and then the interference of black-matrix effect is decreased effectively.

**Key words:** laser beam shaping; black-matrix effect; scalar diffraction theory

## 引言

激光的实际应用中往往要求把高斯光束整形为平顶的矩形、圆形等各种不同的形状, 传统的光学元件很难满足要求, 而计算机光学元件(COE)却能很好地解决这个问题。计算机光学元件在国外的文献中也被称为二元光学元件(BOE), 它是一类基于光波的衍射理论。利用计算机辅助设计, 运用超大规模集成电路制作工艺, 在片基(或传统光学表面)上刻蚀产生2个或多个台阶深度的浮雕结

构, 形成纯相位、同轴再现且具有极高衍射效率的衍射光学元件<sup>[1]</sup>。但是, 计算机光学元件存在着加工工艺复杂、制作设备昂贵的问题, 这导致计算机光学元件的成本较高, 限制了它在实际中的应用。为此, 出现了一些数字化实现COE的方法, 如将设计好的灰度图样输入到TFT-LCD上, 完成对入射光束的调制, 最终得到预期的衍射图样。但是, 这种方法受到黑栅效应的严重干扰, 所得到的图像质量比较低, 无法满足实际需要, 因此需对黑栅效应进

收稿日期: 2009-07-15; 修回日期: 2009-08-20

作者简介: 荆汝宏(1985-), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事二元光学及液晶技术研究工作。

E-mail: jingruhong123@sina.com

行研究以期减弱甚至消除这种干扰。

## 1 原理及设计方法

计算机光学元件的设计过程类似于相位恢复问题,即已知光学系统中输入面和输出面的相位分布,求 COE 输入面上的相位分布,使 COE 能根据需要调节入射光场的相位分布,从而得到我们所需要的振幅分布。目前,计算机光学元件的分析及设计方法主要分为 3 种:几何理论、标量衍射理论和矢量衍射理论。目前比较常用的方法是标量衍射理论,该理论考虑到光波的衍射,但把光波当作标量来处理,也就是只考虑电磁场的一个横向分量的复振幅。由于采取了这种近似的方法,这种理论的适用范围受到了一定限制,只有在 COE 尺寸远大于波长且出射面离 COE 足够远的情况下才能使用。

当前比较流行的一些算法是基于标量衍射理论,如由 Gerchberg 和 Saxton 提出的 G-S 算法<sup>[2]</sup>,杨国帧和顾本源提出的杨-顾算法、IO 算法、模拟退火法等。这些算法大致可以分为 2 类:一类是基于 Fourier 变换的迭代方法,这类方法以成熟的相位恢复模型为基础;另一类是搜索极值的方法,这类方法将计算机光学元件的相位看作泛函空间的一些构形,通过优化过程将这些构形向优化解方向移动,直至满足设计要求为止。

其中第一类算法以 G-S 算法为代表,第二类算法以模拟退火法为代表,一般最常用的是 G-S 算法,其算法的步骤可以概括如下:

1) 先任意给定一输入面上的初始相位分布  $\varphi(x, y)$  (以后每次迭代使用步骤 5) 得到的相位分布), 与入射光的振幅  $|F(x, y)|$  构成入射的波函数  $f(x, y) = |F(x, y)| \cdot e^{i\varphi(x, y)}$ ;

2) 对  $f(x, y)$  作傅里叶变换得到  $g(u, v)$ ;

3) 用  $g(u, v)$  的相位部分和希望得到的振幅  $|G(u, v)|$  部分构成  $g'(u, v) = |G(u, v)| \cdot e^{i\psi}$ ;

4) 对  $g'(u, v)$  作傅里叶逆变换得到  $f'(x, y)$ ;

5) 用  $f'(x, y)$  的相位和入射光的振幅  $|F(x, y)|$  构成下一次迭代的入射波函数  $f(x, y)$ ;

6) 重复以上步骤直到均方误差小于预先规定的指标。

这种算法基于 Fourier 变换的迭代,在输入输出面存在严格 Fourier 变换对的情况下可以快速收敛并得到理想的结果。但是在实际情况中,输入输出面之间往往找不到严格的 Fourier 变换对,在这种情况下,G-S 算法的收敛速度大大下降,这时算

法对初始相位的选择会十分敏感,如果初始相位选择不合理,该算法往往陷入停顿,所以一般情况下选择用几何理论求得的相位分布作为初始值。G-S 算法经过多年的发展,已经出现许多改进,如对 G-S 算法进行加权,对初始相位进行严格的筛选等,不过不管怎样改进,这种方法仅适用于 COE 尺寸远大于光波波长的情况,当波长与 COE 尺寸接近时必须使用复杂的矢量衍射理论<sup>[3]</sup>进行分析和设计。该理论需要考虑光波的偏振性质和不同偏振光之间的相互作用对光的衍射结果的影响,需要在不引入近似的情况下严格解 Maxwell 方程,然而对于许多实际问题,方程并没有封闭的解析解,这就需要使用较多的数学技巧来完成设计。

## 2 实现方法及存在问题

传统的计算机光学元件加工工艺十分复杂,且加工设备昂贵,这就在一定程度上限制了元件的使用,为此我们希望用更加简单的方法来实现计算机光学元件的功能。目前出现了一些数字化的光学元件来实现计算机光学元件的功能。实现方法是:采用前面提到的标量衍射理论,在计算机上编程设计出符合需要的 COE,计算出对应的相位分布并得到灰度图,将得到的灰度图输入到透射式 TFT-LCD 上,利用遮挡效应在成像面上产生预期的衍射图样。这种方法原理较简单,其灰度图是由计算机编程生成,因此该方法可以实现衍射图样的实时变换,但在实际的实现过程中这种方法却存在着一个比较严重的缺陷:黑栅效应严重影响成像质量。

黑栅效应<sup>[4]</sup>是由 TFT-LCD 的结构造成的,TFT-LCD 采用“主动式矩阵”方式来进行驱动,即由相互绝缘的行电极和列电极周期排列组成矩阵;行电极和列电极的交叉点上采用大规模集成电路技术制作薄膜晶体管(TFT),行电极、列电极和现实像素分别接到晶体管的栅极、源极和漏极。由于照射到行电极和列电极上的光会产生光电效应进而引入电路噪声,为了解决这个问题,就在行电极和列电极上镀一层不透光的金属层,行电极和列电极上的光透过率为 0,这就形成一个二维的光栅,我们称之为“黑栅”。黑栅的存在很好地抑制了光电效应引入的电路噪声,但降低了光的利用效率,引入了阵列分布的多个衍射像,使生成的光学数据场的质量大大降低。为便于对黑栅效应进行分析,采用图 1 所示黑栅的结构示意图。相邻像素在  $x$  和  $y$  方向上

错开的间距分别为  $D_x$  和  $D_y$ , 中间不透明黑栅在 2 个方向上的宽度分别为  $W_x$  和  $W_y$ , 这样每个像素实际透光的面积为  $(D_x - W_x) \times (D_y - W_y)$ 。为了定量地计算黑栅效应对光学数据场的影响, 我们设用于整形的 TFT-LCD 有  $E \times F$  个像素, 成像面上取  $G \times H$  个像素, 计算机生成的灰度图为  $P(f_x, f_y; x_0, y_0)$ 。

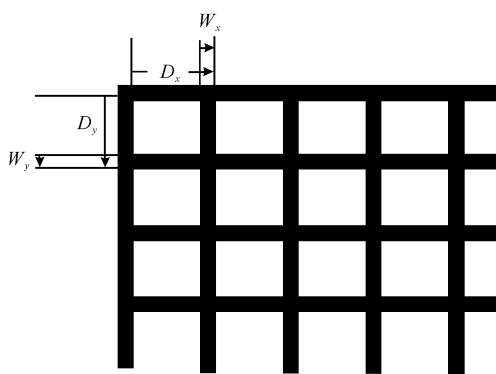


图 1 黑栅结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of black-matrix

由于灰度图显示在 TFT-LCD 上, 故可以将 TFT-LCD 看作一个子系统, 该子系统将入射光束整形为预期结果。我们把黑栅近似为二维光栅, 得到该二维光栅的振幅透射系数  $T(f_x, f_y)$ , 其中:

$$T(f_x, f_y) = \text{rect}\left(\frac{f_x}{W_x/\alpha}, \frac{f_y}{W_y/\alpha}\right) * \sum_{j=0}^F \sum_{i=0}^E \delta \times (f_x - iW_x, f_y - jW_y) = \sum_{j=0}^F \sum_{i=0}^E \text{rect}\left(\frac{f_x - iW_x}{W_x/\alpha}, \frac{f_y - jW_y}{W_y/\alpha}\right). \text{式中 } \alpha = 1 - \frac{(D_x - W_x)(D_y - W_y)}{D_x D_y}.$$

该子系统的系统函数可表示为

$$S(f_x, f_y) = P(f_x, f_y; x_0, y_0) \times T(f_x, f_y) = P(f_x, f_y; x_0, y_0) \times \sum_{j=0}^F \sum_{i=0}^E \text{rect}\left(\frac{f_x - iW_x}{W_x/\alpha}, \frac{f_y - jW_y}{W_y/\alpha}\right).$$

设未加整形的激光光束为  $U(x, y, z)$ , 预期的图像整形结果为  $U_0(x, y, z)$ , 光线沿  $z$  轴传播。我们知道沿  $z$  轴方向传播的基模高斯光束可表示为如下的一般的形式:

$$U(x, y, z) = \frac{c}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \cdot \exp\left\{-i\left[k\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2R}\right) - \arctan \frac{z}{f}\right]\right\}$$

容易看出, 高斯光束的实振幅分布为  $U(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right)$ , 在我们的方法中, 由于 TFT-LCD 的位置一般是固定的, 即  $z$  一定, 则  $\omega(z)$  是常数。

由傅里叶光学可知, 光束透过上述子系统后表达式与系统函数的卷积如下:

$$\begin{aligned} U(x, y) * F^{-1}[S(f_x, f_y)] &= U(x, y) * F^{-1}\left[\sum_{j=0}^F \sum_{i=0}^E \text{rect}\left(\frac{f_x - iW_x}{W_x/\alpha}, \frac{f_y - jW_y}{W_y/\alpha}\right) \times P(f_x, f_y; x_0, y_0)\right] = \\ U(x, y) * F^{-1}\left[\text{rect}\left(\frac{f_x}{EW_x}, \frac{f_y}{FW_y}\right), \text{rect}\left(\frac{f_x}{W_x/\alpha}, \frac{f_y}{W_y/\alpha}\right) \frac{1}{W_x W_y}, \text{comb}\left(\frac{f_x}{W_x}, \frac{f_y}{W_y}\right) \times P(f_x, f_y; x_0, y_0)\right] &= \\ U(x, y) * F^{-1}\left[\text{rect}\left(\frac{f_x}{EW_x}, \frac{f_y}{FW_y}\right), \text{rect}\left(\frac{f_x}{W_x/\alpha}, \frac{f_y}{W_y/\alpha}\right) \frac{1}{W_x W_y}, \text{comb}\left(\frac{f_x}{W_x}, \frac{f_y}{W_y}\right)\right] * P(x, y) &= \\ U_0(x, y) * \left\{EF\alpha^2(W_x W_y)^2, \text{sinc}(EW_x x, FW_y y) * \left[\text{sinc}\left(\frac{W_x x}{\alpha}, \frac{W_y y}{\alpha}\right) \times \text{comb}(W_x x, W_y y)\right]\right\} &= \\ U_0(x, y) * EF\alpha^2(W_x W_y)^2, \text{sinc}(EW_x x, FW_y y) * \left[\sum_{j=0}^F \sum_{i=0}^E \text{sinc}\left(\frac{i}{\alpha}, \frac{j}{\alpha}\right) \delta\left(x - \frac{i}{W_x}, y - \frac{j}{W_y}\right)\right] & \end{aligned}$$

式中  $U_0(x, y)$  是接收面上预期的整形结果。从上面的推导可以看出, 黑栅对预期的整形结果进行了调制, 在接收面上产生了多级像, 且像的强度受到 sinc 函数的调制, 其中像的强度受像素大小及黑栅栅指宽度的影响。为了更加直观地了解黑栅效应的影响, 我们用 MATLAB 软件对不同栅指宽度所对应的光强分布进行了模拟, 设 TFT-LCD 的分辨率为  $1280 \times 1024$  像素, 单个像素尺寸为  $16 \mu\text{m} \times 16 \mu\text{m}$ , 黑栅的栅指宽度为  $3 \mu\text{m}$ , 故有效显示区域大小为  $2.048 \text{ cm} \times 1.638 \text{ cm}$ 。由于黑栅效应是由 TFT-LCD 的固有结构造成的, 并不因为具体的整

形结果而改变, 从光强的角度考虑, 即高斯光束被整形为平顶, 故  $U_0(x, y)$  为常数。编程计算接收屏上各级衍射图样的光强分布, 以接收屏的中心为原点建立坐标系, 为便于观察, 将光强进行归一化处理, 得到的图像如图 2 所示。

图中 3 条曲线分别表示不同黑栅栅指宽度时接收屏  $x$  方向上各点的相对光强分布, 曲线上的数字代表黑栅栅指宽度。由于我们需要的仅仅是一个零级, 其他的级次都可以看作干扰因素, 因此我们希望能量的大部分都集中在零级附近。容易看出, 随着栅指宽度的减小, 光的能量逐渐向接收屏的中

央集中,且曲线陡峭程度增加,当栅指宽度减小到一定程度时,我们就可以将其他的级次忽略不计。

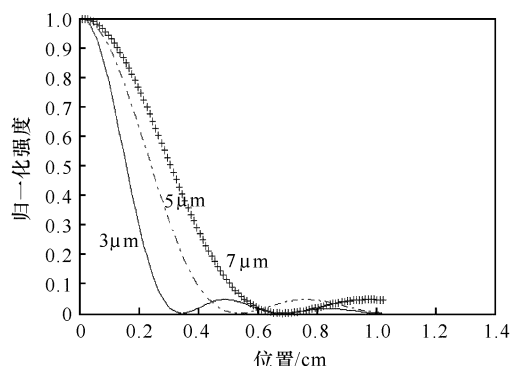


图2 不同栅指宽度对应的光强分布

Fig. 2 Intensity distribution corresponding to different width of black-matrix

### 3 结束语

本文研究了数字化光学元件实现过程中的黑栅效应,利用傅里叶光学分析了黑栅效应对数字化光学元件的影响程度,并进行了计算机模拟。由上面的推导及计算可知:像素大小和栅指宽度是影响黑栅效应强弱的重要因素,减小栅指宽度可有效减弱黑栅效应的干扰,使能量向零级集中,在接收屏

上得到更好的整形图样。

#### 参考文献:

- [1] 金国藩. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.  
JIN Guo-fan. Binary optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [2] GERCHBERG R W, SAXTON W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plan pictures[J]. Optik, 1972(35): 237-246.
- [3] 陈彩花. 二元光学元件分析方法概述[J]. 长春光学精密机械学院学报, 2000, 23(3): 58-63.  
CHEN Cai-hua. Generalization of analysis methods for binary optical elements [J]. Journal of Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, 2000, 23 (3): 58-63. (in Chinese with an English abstract)
- [4] 颜树华,戴一帆,吕海宝,等. 电寻址空间光调制器“黑栅”效应的消除方法[J]. 光子学报, 2002, 31(11): 1421-1424.  
YAN Shu-hua, DAI Yi-fan, LU Hai-bao, et al. Method of eliminating the black-matrix effect of electrical-address spatial light modulator [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31 (11): 1421-1424. (in Chinese with an English abstract)