

光学学报

基于空间光调制器的正交相位光栅衍射特性

翟中生¹, 黄缘胜¹, 李沁洋¹, 余鑫¹, 吕清花^{2*}, 谢博娅¹, 曾臻¹

¹湖北工业大学机械工程学院现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;

²湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068

摘要 利用空间光调制器可编程的特性, 模拟周期、相位调制深度可调的数字正交相位光栅。在分析正交相位光栅结构的基础上, 推导了其透过函数、远场衍射光场和衍射效率的计算方法, 讨论了光栅周期 T 与相位调制深度 ϕ 对正交相位光栅衍射特性的影响。仿真和实验结果表明: 在 $0 \sim \pi$ 的相位变化范围内, 零级光相对光强随着相位深度的增大而逐渐降低, 8 个 1 级光光强逐渐增强; 当 $\phi = \pi$ 时, 零级光相对光强达到最小值 0.25, 此时一级光衍射效率最高为 56.96%; 在 $\pi \sim 2\pi$ 的相位变化范围内, 零级光相对光强随着相位深度的增大而逐渐增强, 而 8 个 1 级光光强逐渐减弱。该研究为正交相位光栅的应用提供了理论依据。

关键词 光栅; 正交相位光栅; 空间光调制器; 衍射光场; 傅里叶频谱

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1605002

Diffraction Characteristics of Orthogonal Phase Grating Based on Spatial Light Modulator

Zhai Zhongsheng¹, Huang Yuansheng¹, Li Qinyang¹, Yu Xin¹, Lü Qinghua^{2*}, Xie Boya¹, Zeng Zhen¹

¹Key Lab of Modern Manufacture Quantity Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China;

²School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China

Abstract In this paper, a digital orthogonal phase grating with adjustable period and phase modulation depth is simulated by using a programmable spatial light modulator. On the basis of analyzing the structure of orthogonal phase grating, its transmission function, far-field diffraction patterns, and diffraction efficiency are derived and calculated, and the influence of grating period T and phase modulation depth ϕ on the diffraction characteristics of orthogonal phase grating is discussed. The simulation and experimental results show that as ϕ increases from 0 to π , the relative intensity of zero-order light decreases gradually, and the intensity of eight first-order lights enhances. When ϕ equals π , the relative intensity of zero-order light reaches the minimum value of 0.25, and the maximum diffraction efficiency of first-order light is 56.96%. As ϕ increases from π to 2π , the relative intensity of zero-order light increases gradually, and the intensity of eight first-order lights decreases. This research provides a theoretical basis for the application of orthogonal phase grating.

Key words gratings; orthogonal phase grating; spatial light modulator; diffraction light field; Fourier spectrum

1 引言

衍射光栅通过对入射光的振幅或相位进行调制实现光场的调控, 在光谱分析、精密测量、信息处理和光通信领域具有广泛的应用^[1-4]。光栅衍射场的准确计算对分析与设计光栅具有重要意义, 一维光栅(如正弦

光栅、闪耀光栅和二元光栅等)的结构相对二维结构比较简单, 目前对其衍射特性的分析比较完善。现有的光栅制造方法一般只能制作出相位固定的二元光栅, 相位可变的光栅则难以实现。

空间光调制器(SLM)以其可编程的特性, 可以很容易地模拟出多种类型的光栅, 许多学者也对 SLM 模

收稿日期: 2022-01-06; 修回日期: 2022-03-09; 录用日期: 2022-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(32071457)、武汉市科技成果转化专项(2020030603012342)

通信作者: *linsa080@hbut.edu.cn

拟的光栅特性进行了分析。2013年 Albero 等^[5]使用 SLM 并利用傅里叶变换的方式对闪耀光栅的二阶衍射级进行了研究分析,通过对闪耀光栅的相位深度进行分析获取不同相位上的光斑强度,对其进行对比,得出闪耀光栅相位深度对其二阶衍射光的影响;2020年 Moreno 等^[6]在此基础上使用 SLM 并对阶梯光栅进行傅里叶分析,分析光栅每个周期的离散步数以及相位调制深度的变化,得出闪耀光栅在每个衍射级下的衍射效率与相位调制深度的关系;同年, Yang 等^[7]使用 SLM 对二元光栅的衍射特性进行分析,通过实验来定义灰度与相位延迟的关系,从而得出衍射效率受像素灰度的影响的结论。研究者们对常见的台阶光栅已经有了充分的了解与认识,但是这仅限于一维方向的衍射,当衍射区域从一维转换为二维时,随之而来的是实验系统复杂、成本高昂、不具有实时调制功能等巨大缺陷。目前对正交相位光栅的研究^[8-12]主要有正交相位光栅的产生方法^[13-16]、利用频谱对其衍射场进行分析^[17],以及其在精密测量方面的应用^[18]。本文分析了渐变正交相位光栅在光束整形中的应用^[19],但目前大多研究采用实验测量的方式对正交相位光栅不同衍射级的衍射光强、衍射效率等参数进行分析研究,而对各衍射级光强的准确推导计算和相位调制深度影响衍射光场的分布规律则分析较少。

为了解决上述问题,分析相位可变正交相位光栅的衍射特性,本文利用 SLM 可编程的特性^[20],模拟出周期、相位调制深度可调的数字正交相位光栅。在分析正交相位光栅结构的基础上,推导出其透过函数、远场衍射光场各级光斑的光强和衍射效率的计算方法,并通过仿真与实验讨论了光栅周期 T 与相位调制深度 ϕ 对正交相位光栅衍射特性的影响,对理论计算进行了验证。本文研究将为正交相位光栅的应用提供理论依据。

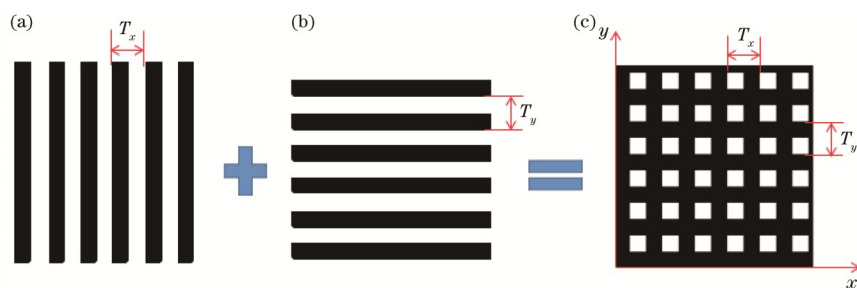


图 2 正交相位光栅组成示意图。(a)径向二元光栅;(b)轴向二元光栅;(c)正交相位光栅

Fig. 2 Schematic diagrams of orthogonal phase grating. (a) Radial binary grating; (b) axial binary grating; (c) orthogonal phase grating

数字相位正交光栅一维方向上的剖面分布如图 3 所示, α 为入射角, θ 为衍射角, T 为光栅周期, $\phi(h)$ 为相位调制深度。

由光栅衍射公式可知

$$T(\sin \alpha + \sin \theta) = m\lambda, \quad (1)$$

式中: m 为衍射级数; λ 为激光波长。由于光束入射 SLM 的角度需小于 10° , 所以入射角 α 可以忽略不计, 可以推出:

2 原理

2.1 SLM 结构对衍射光的影响

SLM 是由许多二维液晶单元组合而成, 每个单元可以独立地被光信号或电信号控制, 液晶单元之间由不改变光信号特性的细小区域隔开(非液晶区), 图 1 为 SLM 填充结构示意图, 灰色部分为液晶填充, 黑色部分无液晶填充。对于反射式 SLM, 非液晶区域相当于平面反射镜, 光直接被反射出去形成零级光。利用 SLM 进行光场衍射调制时, 其衍射效率将受到其固有特性如填充因子、前电极不完善的防反射涂层、电子限制等因素的影响^[21-23], 其中, 填充率为主要影响因素。

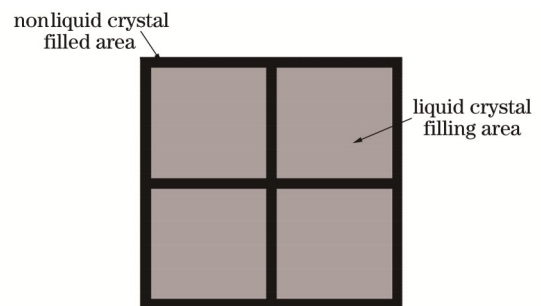


图 1 SLM 填充结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SLM filling structure

2.2 正交相位光栅结构特性分析

正交光栅也可称为二维二元光栅, 它由两个一维方向的二元光栅经灰度正交归一化组合而成, 如图 2 所示, 其中, T_x, T_y 分别为 x, y 方向上的光栅周期。利用 SLM 模拟相位型正交光栅时, 通常利用灰度值来表示相位调制深度, 且灰度值的范围一般为 $0 \sim 255$, 因此, 利用 SLM 模拟的光栅又可称为数字光栅。图 2 中黑色区域的灰度为 0, 白色区域的灰度为 255。

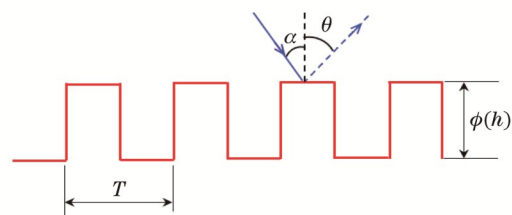


图 3 正交相位光栅剖面图

Fig. 3 Profile of orthogonal phase grating

$$T \sin \alpha = m\lambda. \quad (2)$$

可知,在相同衍射级次且激光波长一定的情况下,衍射角 θ 与光栅周期 T 成反比。

对于一维方向的二元光栅来说,其光栅相位可以描述为

$$\phi_{1D}(x) = \begin{cases} \phi, & 0 \leq x \leq \frac{T}{2} \\ 0, & \frac{T}{2} \leq x \leq T \end{cases}, \quad (3)$$

式中 x 为一维方向上的任意位置。

图 2 所示的正交相位光栅属于二维二元光栅,由图 4 所示单元的周期性结构所构成,在 x, y 方向上都有相位变化,其中, b_x, b_y 分别为 x, y 方向非零相位区域的大小。若 x, y 方向上的光栅周期分别为 T_x, T_y , 占空比为 0.5 时,则一个周期内的光栅相位为

$$\phi_{2D}(x, y) = \begin{cases} \phi, & 0 \leq x \leq \frac{T_x}{2}, 0 \leq y \leq \frac{T_y}{2} \\ 0, & \text{others} \end{cases}. \quad (4)$$

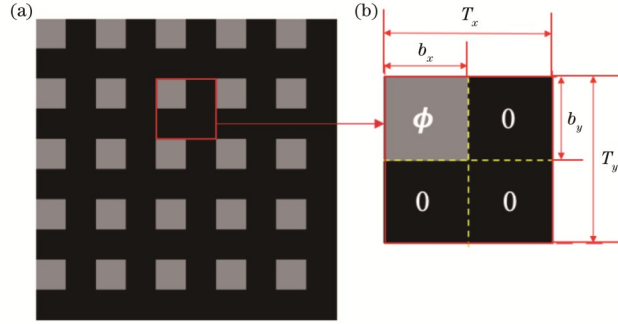


图 4 正交相位光栅结构图。(a)正交相位光栅;(b)正交相位光栅单元结构

Fig. 4 Orthogonal phase grating structure diagrams. (a) Orthogonal phase grating; (b) element structure of orthogonal grating

图 4(b)所示光栅的透过函数可表示为

$$g(x, y) = r \exp(i\phi) \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_y}{2}}{T_y}\right) + (1 - r) \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_y}{2}}{T_y}\right) + \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{x - \frac{b_y}{2}}{T_y}\right) + \text{rect}\left(\frac{x - \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_y}{2}}{T_y}\right) + \text{rect}\left(\frac{x - \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{x - \frac{b_y}{2}}{T_y}\right), \quad (5)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 代表矩形函数; r 为 SLM 的填充率。本文实验采用的 SLM 型号为 Hamamatsu 的 X10468-02, 填充率可达到 98%, 由非液晶区产生的零级光能量占比非常小, 且非 0 级衍射光的理论推导过程非常复杂。为了简化理论推导, 后面的分析中将忽略填充率的影响, 故得到

$$g(x, y) = \exp(i\phi) \text{rect}\left[\frac{x + \frac{b_x}{2}}{T_x}\right] \text{rect}\left[\frac{y - \frac{b_y}{2}}{T_y}\right] + \text{rect}\left[\frac{x - \frac{b_x}{2}}{T_x}\right] \text{rect}\left[\frac{y - \frac{b_y}{2}}{T_y}\right] + \text{rect}\left[\frac{x - \frac{b_x}{2}}{T_x}\right] \text{rect}\left[\frac{y + \frac{b_y}{2}}{T_y}\right] + \text{rect}\left[\frac{x + \frac{b_x}{2}}{T_x}\right] \text{rect}\left[\frac{y + \frac{b_y}{2}}{T_y}\right]. \quad (6)$$

整个正弦相位光栅的透过函数为

$$f(x, y) = g(x, y) \otimes \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \delta(x - x_i) \delta(y - y_j), \quad (7)$$

式中: \otimes 为卷积算子; (x_i, y_j) 为第 (i, j) 个单元的中心

坐标; $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数。

2.3 正交相位光栅衍射场分析

正交相位光栅的远场衍射可利用傅里叶变换求得:

$$F(U_x, U_y) = \mathcal{F}[f(x, y)] = \frac{1}{4} \operatorname{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(i \frac{m_x \pi}{2} - i \frac{m_y \pi}{2}\right) \exp(i\phi) + \frac{1}{4} \operatorname{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(-i \frac{m_x \pi}{2} + i \frac{m_y \pi}{2}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(-i \frac{m_x \pi}{2} - i \frac{m_y \pi}{2}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(i \frac{m_x \pi}{2} + i \frac{m_y \pi}{2}\right), \quad (8)$$

式中： m_x, m_y 为二维平面的衍射级次； $\operatorname{sinc} x = \sin x/x$ 。由式(8)知，当 m_x, m_y 为偶数时， $F(U_x, U_y) = 0$ ，因此，衍射光场只存在 0 级和奇数级衍射光。

图 5 给出了正交相位光栅经傅里叶变换后的衍射场光强分布，傅里叶平面上的频率 U_x, U_y 与光栅的周期 T_x, T_y 有如下关系：

$$\begin{cases} U_x = \frac{1}{T_x} \\ U_y = \frac{1}{T_y} \end{cases} \quad (9)$$

图 5(b) 所示的正交相位光栅衍射光强图主要由 $(m_x = 0, m_y = 0)$ 、 $(m_x = 0, m_y = \pm 1)$ 、 $(m_x = \pm 1, m_y = 0)$ 及 $(m_x = \pm 1, m_y = \pm 1)$ 9 个级次组成，其他高阶衍射级由于能量比较弱，图中没有给出。9 个级次的光强值都可以利用式(8)求出。

对于零级，将 $m_x = 0, m_y = 0$ 代入式(8)后，求得相对光强为

$$I_{(0,0)} = |F(U_x, U_y)|^2 = \frac{1}{8} (5 + 3 \cos \phi). \quad (10)$$

由式(7)可求出衍射平面的轴上相对衍射光强为

$$I_{(0, \pm m_y)} = I_{(\pm m_x, 0)} = \frac{1}{4} \left(\frac{2}{m\pi} \sin \frac{\phi}{2} \right)^2, \quad (11)$$

式中： m 为 m_x 或 m_y ，当 $m = 1$ 时，可求出 $(m_x = 0, m_y = \pm 1)$ 、 $(m_x = \pm 1, m_y = 0)$ 时的光强，且这 4 个级次的光强相等。为了后续分析方便，以 $(0, 1)$ 级作为代表。

同理，可求出图 5(b) 中所示 $(-1, 1)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(-1, -1)$ 、 $(1, -1)$ 4 个衍射光斑的相对光强为

$$I_{(\pm 1, \pm 1)} = \left(\frac{2}{\pi^2} \sin \frac{\phi}{2} \right)^2. \quad (12)$$

为了方便后续分析，将这 4 个衍射光斑统称为 $(1, 1)$ 级光斑，从式(12)可看出， $(1, 1)$ 级衍射光强也受调制深度的影响。

除了上面分析的 0 级和 8 个 1 级的衍射光外，还有 $m_x = \pm 3$ 或 $m_y = \pm 3$ 级及以上的衍射光，但由于光强占比非常小，可以忽略不计。

由式(9)~(11)可看出，不同级次的光强大小都与正交相位光栅的相位调制深度 ϕ 有关。对于 SLM 而言，不同的灰度代表不同的相位深度，因此对于同一周期下的不同灰度等级，其正交相位光栅的调制深度是可以不同的^[17]。图 6 给出了三种不同灰度等级的一维分布情况，由式(9)~(11)可知，通过改变正交相位光栅的灰度值，可以改变输出的零级光强度与衍射光束强度的占比。图 6 中， h_1, h_2, h_3 为不同灰度值。

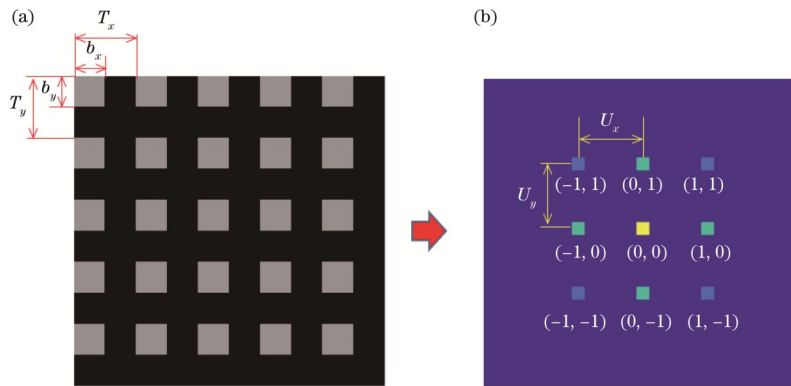


图 5 正交相位光栅结果及其衍射光强图。(a) 正交相位光栅；(b) 正交相位光栅衍射图样

Fig. 5 Orthogonal grating results and their diffraction light intensity. (a) Orthogonal phase grating; (b) diffraction pattern of orthogonal phase grating

2.4 正交相位光栅衍射效率分析

衍射效率是衡量光栅性能的重要指标之一，对于正交相位光栅而言，由于其衍射级次较多，由式(11)可计算出 $(m_x = 0, m_y = \pm 1)$ 、 $(m_x = \pm 1, m_y = 0)$ 4 个衍射级的衍射效率为

$$\eta_{\pm 1,0} = \frac{1}{4} \left[\frac{2}{\pi} \sin \frac{\phi(h)}{2} \right]^2. \quad (13)$$

对于 $(m_x = \pm 1, m_y = \pm 1)$ 4 个对角的衍射光斑，其衍射效率为

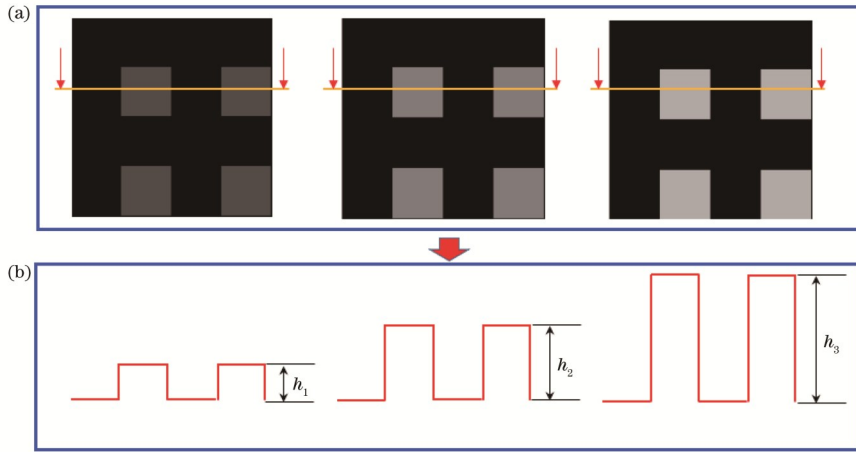


图 6 不同灰度等级的正交相位光栅示意图。(a)不同灰度等级的正交相位光栅结构图;(b)正交相位光栅一维分布情况
Fig. 6 Schematic diagrams of orthogonal phase grating with different grey levels. (a) Structural diagram of orthogonal phase gratings with different gray grades; (b) one-dimensional distribution of orthogonal phase grating

$$\eta_{\pm 1, \pm 1} = \left\{ \frac{2}{\pi^2} \sin \left[\frac{\phi(h)}{2} \right] \right\}^2 \quad (14)$$

从式(13)、(14)可看出,零级四周的8个衍射光斑的衍射效率都受相位调制深度 $\phi(h)$ 的影响。因式(13)、(14)都与1级光相关,可将8个衍射光都统计为1级衍射,则1级衍射光的总衍射效率为

$$\eta_1 = \left\{ \frac{2}{\pi} \sin \left[\frac{\phi(h)}{2} \right] \right\}^2 + 4 \left\{ \frac{2}{\pi^2} \sin \left[\frac{\phi(h)}{2} \right] \right\}^2 \quad (15)$$

其他高阶光的光强占比非常小,可以忽略不计。

3 仿真分析

3.1 光栅周期的影响仿真分析

图7(a)为周期 T 为 50, 100, 250 pixel 的正交相位光栅灰度图,图7(b)为对应的衍射图样。从图7(b)可以发现:光栅周期的增大导致衍射角逐渐减小,中心的0阶光与周边1阶光的距离逐渐减小,因此可以通过改变正交相位光栅的周期,调节1级光与0级光之间的距离。各衍射级的光强不受光栅周期影响。

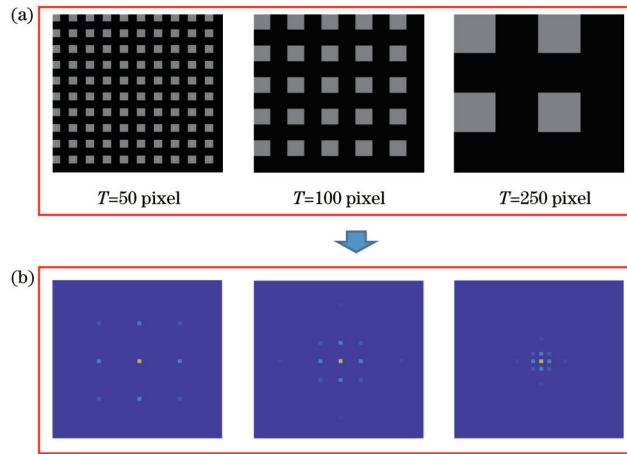


图 7 周期不同的正交相位光栅及其衍射图样。(a)不同周期的正交相位光栅;(b)不同周期的正交相位光栅对应的衍射图样
Fig. 7 Orthogonal phase gratings with different period and corresponding diffraction patterns. (a) Orthogonal phase gratings with different periods; (b) diffraction patterns corresponding to orthogonal phase gratings with different periods

3.2 相位调制深度的影响仿真分析

为了验证上述理论推导的正确性,进行仿真分析。设计正交相位光栅,占空比保持 0.5 不变,相位调制深度 ϕ 取不同的值,图8给出了不同相位调制深度的正交相位光栅及其傅里叶变换结果。从图8中可看出:随着 ϕ 值的增大,能量逐渐从零级分散到4个(0,1)和4个(1,1)级上;当相位 $\phi = \pi$ 时,零级光变得最弱,此时其他衍射级的能量最强;随着 ϕ 的继续增大,零级光

的光强增强。具体数值见表1。

表1给出了利用式(9)~(11)和傅里叶变换得到的计算结果,从表中可看出,两种方法的计算结果基本一致,细微区别的产生原因是:傅里叶变换计算中采样率和采样区间受限。仿真结果证明了前面理论推导的正确性。

图9给出了灰度等级从0变化到255(对应 ϕ 为 $0 \sim 2\pi$)时,0级光、(0,1)和(1,1)级的强度变化曲线,从曲

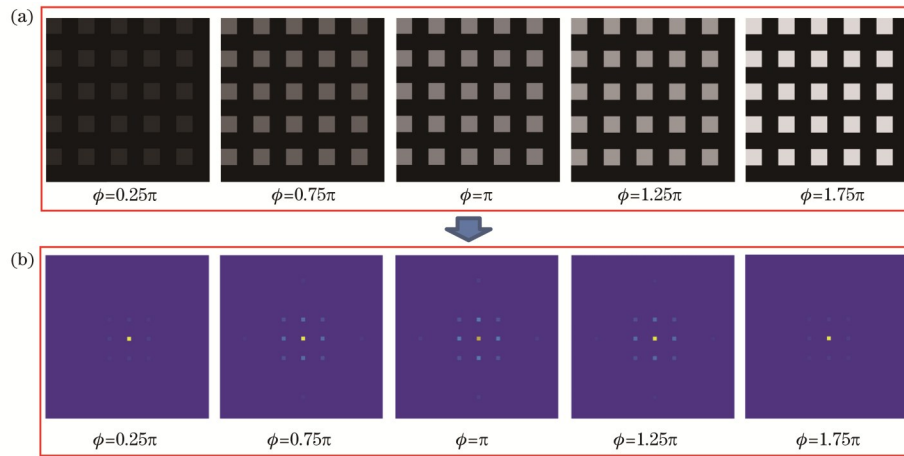


图 8 不同相位调制深度的正交相位光栅及其衍射图样。(a)不同相位调制深度的正交相位光栅结构图;(b)不同相位调制深度的正交相位光栅对应的衍射图样

Fig. 8 Orthogonal phase gratings with different phase modulation depth and corresponding diffraction patterns. (a) Structural diagrams of orthogonal phase gratings with different phase modulation depths; (b) diffraction patterns corresponding to orthogonal phase gratings with different phase modulation depth

表 1 由式(9)~(11)和傅里叶变换计算的不同阶数的光强

Table 1 Intensity of different orders calculated by Eqs. (9)-(11) and Fourier transform

ϕ	Intensity calculated by Eqs. (9)-(11)			Intensity calculated by Fourier transform		
	0 order	(0,1) order	(1,1) order	0 order	(0,1) order	(1,1) order
0	1.0000	0	0	1.0000	0	0
0.25 π	0.8902	0.0148	0.006	0.8908	0.0147	0.0060
0.5 π	0.6250	0.0507	0.0205	0.6270	0.0502	0.0205
0.75 π	0.3598	0.0865	0.0351	0.3633	0.0858	0.0351
π	0.2500	0.1013	0.0411	0.2540	0.1005	0.0411
1.25 π	0.3598	0.0865	0.0351	0.3633	0.0858	0.0351
1.5 π	0.6250	0.0507	0.0205	0.6270	0.0502	0.0205
1.75 π	0.8902	0.0148	0.0060	0.8908	0.0147	0.0060
2 π	1.0000	0	0	1.0000	0	0

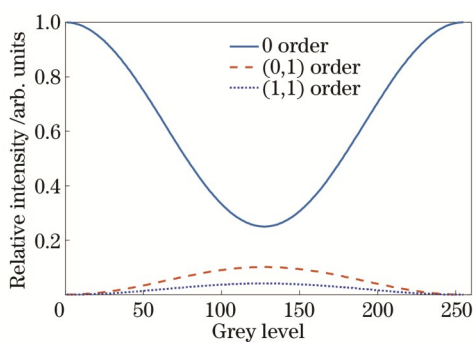


图 9 不同衍射级的相对光强随灰度等级的变化

Fig. 9 Variation of relative intensity of different diffraction orders varying with grey level

线的变化趋势可看出:在灰度为 127($\phi = \pi$)时,0 级光的光强最小,(0,1)和(1,1)级光强最大,因此通过改变灰度值(相位调制深度)能够改变衍射场的光强分布。图 10 给出了 1 级光的衍射效率图,其变化规律与零级光的光强相反。当 $\phi = \pi$ 时,衍射效率达到最高,为

56.96%。

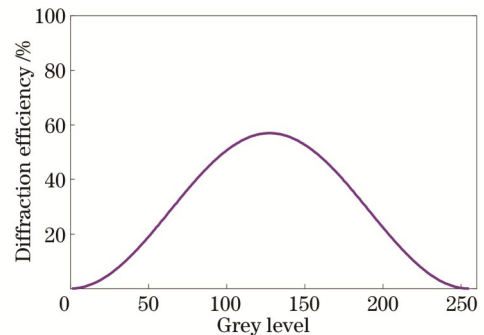


图 10 1 级光衍射效率随灰度等级的变化

Fig. 10 Variation of diffraction efficiency of 1st order light varying with grey level

4 实验结果

实际实验中选用的 SLM 型号为 Hamamatsu 的 X10468-02,皮秒激光放大器型号为 PINE-1064-40B,

输出激光束的直径 $D = 7.5 \text{ mm}$, 波长 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, 脉冲宽度 $T_p = 10 \text{ ps}$, 重复频率 $f_r = 100 \text{ kHz}$. 透镜焦距为 300 mm , 利用 CCD 相机采集透镜后的衍射光强。入射光束为圆形, 故观测到的光斑形状也呈现圆形。在仿真中, 默认输入光是照射整个方形 SLM, 相当于有个方形的光阑, 因此在图 5、图 7 和图 8 中, 衍射光强分布为方形的。

将图 6 所示的相位光栅图输入到 SLM 中, ϕ 为 $0.25\pi, 0.75\pi, \pi, 1.25\pi, 1.75\pi$ 时, 相机采集的结果如图

11 所示, 图 11 中的变化结果与图 7 的仿真结果一致, 测得的 0 级光和 (0, 1) 级光的光强随灰度等级的变化曲线如图 12 所示。从图 12 中可看出: 该型号 SLM 相位 $\phi = \pi$ 时, 对应的灰度值为 110 左右; 灰度等级从 0 增加至 110 时, 0 阶光能量占比逐渐降低; 灰度值为 110 时, 零级光强达到最小值, 相对强度为 0.2550, 此时 (0, 1) 级光斑光强达到最大值 0.09 (略小于理论值 0.1013, 见表 1); 当灰度等级从 110 增加至 220 时, 0 阶光相对光强逐渐升高, (0, 1) 阶光强逐渐降低。

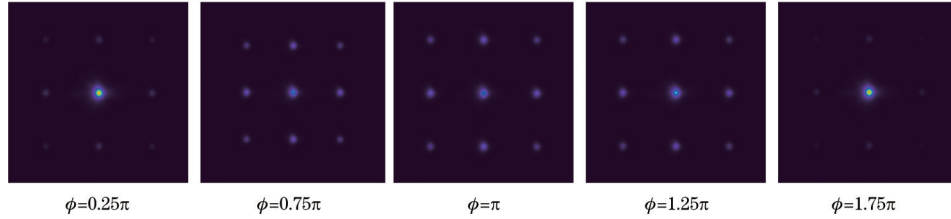


图 11 不同相位调制深度下正交相位光栅的衍射实验结果

Fig. 11 Experimental results of diffraction for orthogonal phase gratings with different phase modulation depth

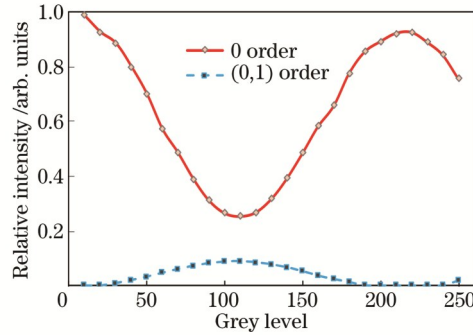


图 12 实验得到的不同衍射级的相对光强随灰度的变化

Fig. 12 Experimental results of relative intensity of different diffraction orders varying with grey level

图 12 中的实验数据与理论仿真结果存在细微差异, 该差异主要由 SLM 固有特性引起, 将理论分析部分忽略的填充因子引入, 实际上等同于减小相位调制

部分的面积, 已知实验中用到的 SLM 填充率为 98%, 故式(5)中 $r = 0.98$ 时, 有

$$g(x, y) = 0.98 \exp(i\phi) \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y - \frac{b_y}{2}}{T_y}\right) + 0.02 \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y - \frac{b_y}{2}}{T_y}\right) + \text{rect}\left(\frac{x + \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y + \frac{b_y}{2}}{T_y}\right) + \text{rect}\left(\frac{x - \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y + \frac{b_y}{2}}{T_y}\right) + \text{rect}\left(\frac{x - \frac{b_x}{2}}{T_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y - \frac{b_y}{2}}{T_y}\right). \quad (16)$$

对式(16)进行傅里叶变换, 可得

$$F(U_x, U_y) = \mathcal{F}[f(x, y)] = \frac{49}{200} \text{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(i \frac{m_x \pi}{2} - i \frac{m_y \pi}{2}\right) \exp(i\phi) + \frac{1}{200} \text{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(i \frac{m_x \pi}{2} - i \frac{m_y \pi}{2}\right) + \frac{1}{4} \text{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(-i \frac{m_x \pi}{2} + i \frac{m_y \pi}{2}\right) + \frac{1}{4} \text{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(-i \frac{m_x \pi}{2} - i \frac{m_y \pi}{2}\right) + \frac{1}{4} \text{sinc}\left(\frac{m_x \pi}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{m_y \pi}{2}\right) \exp\left(i \frac{m_x \pi}{2} + i \frac{m_y \pi}{2}\right). \quad (17)$$

对于零级,将 $m_x = 0, m_y = 0$ 代入式(17)后,求得零衍射级的相对光强为

$$I_{(0,0)} = \left| F(U_x, U_y) \right|^2 = \frac{1}{40000} (25202 + 14798 \cos \phi). \quad (18)$$

表 2 给出了考虑填充因子后计算与实验数据的比较,从表 2 中数据可看出:在 $0 \sim \pi$ 范围内,实验结果与理论结果比较一致;但随着调制深度的增大,零级光强的实验结果要小于理论值,该现象是由前电极不完善的防反射涂层、电子限制等因素的影响产生的^[21]。

表 2 利用式(18)与实验得到的零级光光强对比
Table 2 Intensity of zero-orders calculated by Eq. (18) and experiments

ϕ	Intensity	
	Calculated by Eq. (18)	Experimental result
0	1.000	1.000
0.25 π	0.892	0.889
0.50 π	0.630	0.630
0.75 π	0.369	0.371
π	0.260	0.255
1.25 π	0.369	0.375
1.50 π	0.630	0.621
1.75 π	0.892	0.885
2.00 π	1.000	0.925

5 讨 论

1) 利用 SLM 可以很容易产生相位调制深度不同的正交相位光栅。对于占空比为 0.5 的正交相位光栅,当相位调制深度为 π 时,其零级光相对光强达到最小值 0.25;但是,对于占空比为 0.5 的一维二元光栅,当相位调制深度为 π 时,其零级光则为 0。其原因可从如图 4(b)所示的光栅单元进行分析可得:一个正交单元可看成由 4 个块区域组成,其中 3 块是由零相位部分组成,而实际起相位调制作用的只有 1 块区域,其实际占空比为 0.25,因此,很难将零级光降至 0。但可通过设计不同占空比的正交相位光栅进一步改善零级光的光强分布,如增大图 5(a)中的 b_x, b_y 。

2) 相位可变的正交相位光栅可用于光束整形中。通过设计合适的周期和灰度值,正交相位光栅能够将零级光能量向四周衍射开,用于光束整形中,进而改善区域内的能量均匀性。

3) 从零级光的相对光强计算公式可看出,该公式可用于测量相位型 SLM 的相位调制曲线,通过测量设定灰度值的正交相位光栅对应的零级光相对光强,推算出对应的相位调制深度,从而建立起灰度值与相位调制的对应关系。

6 结 论

本文利用 SLM 可编程的特性,模拟出周期、相位

调制深度可调的数字正交相位光栅。在分析正交相位光栅结构的基础上,推导了正交相位光栅的透过函数、远场衍射光场的计算公式,分析了衍射场中 0 级、8 个 1 级光斑的相对光强和 1 级光衍射效率的计算方法,并给出了光栅周期 T 与相位调制深度 ϕ 对正交相位光栅衍射特性的影响规律。本文研究将为正交相位光栅在光束整形、精密测量等领域的应用提供理论依据。

参 考 文 献

- [1] 樊叔维,周庆华,李红. 槽型衍射光栅结构参数优化设计研究[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3133-3139.
Fan S W, Zhou Q H, Li H. Research of optimization design of groove diffraction grating profile parameters[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3133-3139.
- [2] Yu M, Gao J S, Zhang J, et al. Suppression of the stray light of 2-dimensional gratings combined with an array of periodic slit[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 204208.
- [3] Zhou C G, Wang Y N, Chen Y H, et al. Alignment measurement of two-dimensional zero-reference marks [J]. Precision Engineering, 2006, 30(2): 238-241.
- [4] 张周强,周玲,郭忠超,等. 基于电驱动纳米光栅的结构设计及仿真分析[J]. 光学学报, 2021, 41(21): 2105001.
Zhang Z Q, Zhou L, Guo Z C, et al. Structure design and simulation analysis based on electrically driven nanograting[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(21): 2105001.
- [5] Albero J, García-Martínez P, Luis Martínez J, et al. Second order diffractive optical elements in a spatial light modulator with large phase dynamic range[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(2): 111-115.
- [6] Moreno I, Gutierrez B K, Sánchez-López M M, et al. Diffraction efficiency of stepped gratings using high phase-modulation spatial light modulators[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 126: 105910.
- [7] Yang S Y, Yang H, Qin L, et al. Measuring the relationship between grayscale and phase retardation of LCoS based on binary optics[J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2020, 51: 140-143.
- [8] Cheng G L, Cong L, Chen A X. Two-dimensional electromagnetically induced grating via gain and phase modulation in a two-level system[J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2016, 49(8): 085501.
- [9] Zhang X B, Qiu Y S, Chen H X, et al. Design of fused-silica transmission gratings for orthogonal polarizing beam combiners[J]. Optics Communications, 2014, 333: 75-79.
- [10] Srivastava A K, Hu W, Chigrinov V G, et al. Fast switchable grating based on orthogonal photo alignments of ferroelectric liquid crystals[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(3): 031112.
- [11] 李付谦,陈文静. 正交光栅相移轮廓术的相位误差分析及其校正[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 1412002.
Li F Q, Chen W J. Phase error analysis and correction

- for phase shifting profilometry using crossed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1412002.
- [12] Lin C B, Yan S H, Du Z G, et al. High-efficiency gold-coated cross-grating for heterodyne grating interferometer with improved signal contrast and optical subdivision[J]. *Optics Communications*, 2015, 339: 86-93.
- [13] Hu W, Kumar Srivastava A, Lin X W, et al. Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 111116.
- [14] 樊叔维. 二元光栅衍射特性的矢量理论分析[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 30-36.
Fan S W. The vector theory analysis of binary gratings diffraction characteristics[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(5): 30-36.
- [15] Zhu J C, Zhou J K, Shen W M. Polarisation-independent diffraction grating based on dielectric metasurface[J]. *Electronics Letters*, 2019, 55(13): 756-759.
- [16] 袁霞, 王晶晶, 金华阳. 一种正交光栅频谱分布的理论分析[J]. *大学物理实验*, 2011, 24(2): 43-44, 48.
Yuan X, Wang J J, Jin H Y. Analysis of spatial spectrum distribution of a cross-grating[J]. *Physical Experiment of College*, 2011, 24(2): 43-44, 48.
- [17] 夏豪杰, 费业泰, 王中宇. 二维光栅频谱分析及在精密测量中的应用[J]. *光子学报*, 2007, 36(4): 726-729.
Xia H J, Fei Y T, Wang Z Y. The 2-D grating's spectrum analysis and application in precise measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(4): 726-729.
- [18] 陈林, 黄林海, 李新阳. 基于二维正交光栅的高精度质心探测方法[J]. *光电工程*, 2017, 44(9): 912-918, 933.
Chen L, Huang L H, Li X Y. A high-precision centroid detecting method based on two-dimension orthogonal gratings[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(9): 912-918, 933.
- [19] Zhai Z S, Cao W Z, Gao T, et al. Beam shaping with high energy utilization and uniformity using gradient orthogonal gratings[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(17): 5104-5109.
- [20] 何泽浩, 隋晓萌, 曹良才, 等. 基于参数空间遍历的空间光调制器量化取值优化[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 1209002.
He Z H, Sui X M, Cao L C, et al. Optimization of quantization value for spatial light modulators based on parameter space traversal[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1209002.
- [21] Ronzitti E, Guillon M, de Sars V, et al. LCoS nematic SLM characterization and modeling for diffraction efficiency optimization, zero and ghost orders suppression [J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 17843-17855.
- [22] Arrizón V, Carreón E, Testorf M. Implementation of Fourier array illuminators using pixelated SLM: efficiency limitations[J]. *Optics Communications*, 1999, 160(4/5/6): 207-213.
- [23] Khonina S N, Porfirev A P, Ustinov A V. Diffraction patterns with mth order symmetry generated by sectional spiral phase plates[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(12): 125607.