

## 利用达曼光栅灰度图去除零级光干扰

吴嘉元<sup>1</sup>, 韩军<sup>1\*</sup>, 王谦豪<sup>2</sup>, 赵华龙<sup>2</sup><sup>1</sup>西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021;<sup>2</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所光子制造系统与应用研究中心, 陕西 西安 710119

**摘要** 液晶空间光调制器(LCSLM)加载计算全息图实现激光分束时,会在焦平面处产生零级光干扰,为了解决这一情况,提出一种加载达曼光栅灰度图至液晶空间光调制器的方法,利用相消干涉,从而消除零级光干扰。基于模拟退火算法,求解出相位转折点集,在 VirtualLab 中进行仿真模拟,利用 MATLAB 软件编写生成达曼光栅灰度图的脚本文件,搭建基于硅基液晶空间光调制器(LCOSSLM)的验证系统,对调制效果进行测验。结果表明:通过加载达曼光栅灰度图进行激光分束,在 CCD 视场内明显去除了零级光干扰,且实际分束效果与仿真模拟结果相近,在一维五分束下的分束均匀度达 97.190%,优于 GSW 算法生成的光栅形式全息图的调制效果。以大光点间距进行一维二、七分束的效果观测,分束均匀度分别达 98.453%、96.820%,又进行二维分束观测,测量分束均匀度可达 95.436%,且均未在 CCD 视场内观测到零级光。

**关键词** 液晶空间光调制器; 飞秒激光; 纯相位调制; 达曼光栅; 衍射结构

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231115

## Removal of Zero-Order Beam Interference using Dammann Grating Grayscale Map

Wu Jiayuan<sup>1</sup>, Han Jun<sup>1\*</sup>, Wang Qianhao<sup>2</sup>, Zhao Hualong<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Opto-Electronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;<sup>2</sup>Photonic Manufacturing Systems and Applications Research Center, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, Shaanxi, China

**Abstract** Zero-order beam interference is generated at the focal plane when the liquid crystal spatial light modulator (LCSLM) is loaded with a computer-generated hologram (CGH) during laser beam splitting. To address this issue, we proposed to load a Dammann grating grayscale map to LCSLM using phase extinction interference, thereby removing zero-order beam interference. Based on the simulated annealing algorithm, the set of phase turning points was solved; simulations were performed in VirtualLab; and a script for generating Dammann grating grayscale maps was written using MATLAB software. Consequently, a verification system was built based on a liquid crystal on silicon spatial light modulator (LCOSSLM), and its modulation effect was tested. The results show that the zero-order beam interference is removed in the CCD field of view by loading the Dammann grating grayscale map for laser beam splitting. Moreover, the actual beam-splitting effect is close to that observed in the simulation results. Furthermore, the beam-splitting uniformity under one-dimensional five-beam splitting reaches 97.190%, which is better than the modulation effect of the grating CGH generated by the GSW algorithm. When the focal distance is large, effects of one-dimensional two- and seven-beam splitting are observed with beam-splitting uniformity levels of 98.453% and 96.820% respectively. The two-dimensional beam splitting is also observed with a measured beam-splitting uniformity of 95.436%. In addition, no zero-order beam is observed in the CCD field of view.

**Key words** liquid crystal spatial light modulator; femtosecond laser; pure phase modulation; Dammann grating; diffraction structure

## 1 引言

激光分束技术可广泛应用于激光并行加工、激光

通信、扫描成像、全息光镊等领域中<sup>[1-5]</sup>。常规的超快激光微加工设备采用单一光束进行作业,装配有激光分束模块的设备称为并行加工设备,可以大幅度提高

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-06-07; 录用日期: 2023-07-12; 网络首发日期: 2023-08-07

通信作者: \*hanjun513@126.com

加工效率。产生激光分束的方式有很多,例如使用衍射光学元件<sup>[6]</sup>、空间光调制器<sup>[7]</sup>、多光束干涉法<sup>[8]</sup>、激光器阵列法<sup>[9]</sup>等。衍射光学元件是基于衍射光学理论结合计算机辅助设计的光学元件<sup>[10]</sup>,具有体积小、薄而轻的优点,虽有极高的衍射效率,但固定结构限制了光场调制的灵活性。随着计算机技术和光电器件的快速发展,液晶空间光调制器(LCSLM)的问世解决了光场动态调制难的问题,通过加载计算全息图(CGH)可以实现激光分束<sup>[11]</sup>。但是目前 LCSLM 在使用中也存在一些问题,如光能利用率低造成的光强损失、填充因子存在使零级光干扰多焦点光强分布、像素结构与精度之间的问题等<sup>[12]</sup>。

在激光并行加工中,零级光干扰会极大影响加工一致性<sup>[13]</sup>。常规去除零级光的方法有多种,例如对计算全息图叠加闪耀光栅<sup>[14]</sup>或非涅耳透镜灰度图<sup>[15]</sup>,使零级光与多焦点衍射图像在 X、Y、Z 方向上得到分离,因为进行一步操作需要制作两幅图像并叠加,所以步骤较为繁琐,且易导致衍射效率下降。通过提升液晶空间光调制器硬件性能,如填充率和线性度,从根本上减小非调制光比例,虽合理但短期内提升难度较大。因此,找到一种液晶空间光调制器在调制相位同时还能够去除零级光干扰的简单方法就很有必要。

达曼光栅是典型的二元光学元件,近年来,北京科技大学的王晓玲等<sup>[16]</sup>设计了  $5 \times 5$  分束达曼光栅的工艺方法,对制造出的达曼光栅进行平台验证,光强不均匀度仅为 0.16%。上海交通大学的余日银等<sup>[17]</sup>使用  $7 \times 7$  点阵达曼光栅对激光进行分束后将其与光

纤阵列精确耦合,不均匀度小于 30%。达曼光栅可以产生等间距、等光强的光点分布,但固定结构的光栅实物的灵活性低,将其结构转换为灰度图形式加载至液晶空间光调制器中,可以有效提升分束灵活性。因达曼光栅特有的  $0, \pi$  二值相位周期分布,部分调制后的光束与相差半波长光程差的零级光发生相消干涉,从而去除这一部分的空间振幅。本文将达曼光栅结构转换为灰度图形式,将其加载至基于硅基液晶空间光调制器(LCOSSLM)的激光分束验证系统中,实现达曼光栅结构和相位调制的动态切换,并验证其在相位调制同时消除零级光的可行性,与达曼光栅仿真模拟及计算全息图的分束效果进行对比,并对实验结果进行了分析与讨论。

## 2 原理及仿真模拟

### 2.1 达曼光栅及零级光去除

达曼光栅是一种  $0, \pi$  两种相位交替,按多周期扩展构成的光栅结构。入射光通过达曼光栅后,会在频谱面处形成等间距、等光强的多焦点阵列光分布。达曼光栅可以很好地消除 sinc 函数包络影响,使得调制后的多光束具有很好的光强一致性。达曼光栅按结构可以分为奇数型和偶数型<sup>[18]</sup>,图 1 所示为典型奇偶达曼光栅的归一化周期结构。偶数型达曼光栅的相位分布是以奇数型变化而来的,它的特点是:前半周期的相位分布精确地等于后半周期的相位分布反转,可以排除 0 级衍射光对制作误差的敏感性,这也是偶数型相比奇数型产生多焦点分布均匀性更高的原因。

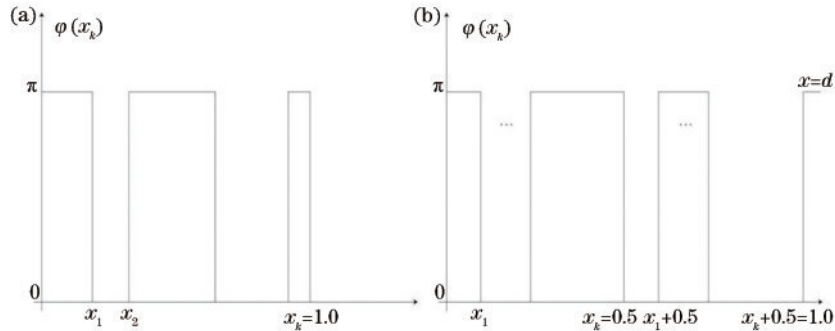


图 1 达曼光栅归一化周期结构。(a)奇数型;(b)偶数型

Fig. 1 Normalized period structure of Damman grating. (a) Odd type; (b) even type

图 1 中,  $\varphi$  表示相位延迟,  $x$  为归一化周期的距离,  $x_k$  为第  $k$  个相位转折点的坐标,  $\{x_k\}$  表示归一化周期内的有效相位转折点坐标集,  $K$  为完整的相位转折点数量,  $k$  为相位转折点序号,其中所需求解的有效相位转折点  $k=1, 2, \dots, K-1$ , 此外  $x_0=0, x_K=1.0$ 。对于零级次光点,其强度为

$$I_0 = \left[ 1 + \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k x_k \right]^2. \quad (1)$$

对于非零级次光点,其强度为

$$I_n = \left( \frac{1}{n\pi} \right)^2 \left\{ \left[ \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k \sin \alpha_k \right]^2 + \left[ 1 + \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k \cos \alpha_k \right]^2 \right\}, \quad (2)$$

式中:  $\alpha_k$  为第  $k$  个相位转折点在第  $n$  级衍射级次上对应的相位角,  $\alpha_k = 2n\pi x_k$ ;  $n$  为光点阵列的衍射级次。

对于液晶空间光调制器的液晶面板,因其像素间存在像素间隔,入射至像素间隔处的光会以未被调制形式出射,未调制的光束经傅里叶透镜后在频谱面处会形成零级光。如图 2 所示,有效像素面积与周期内

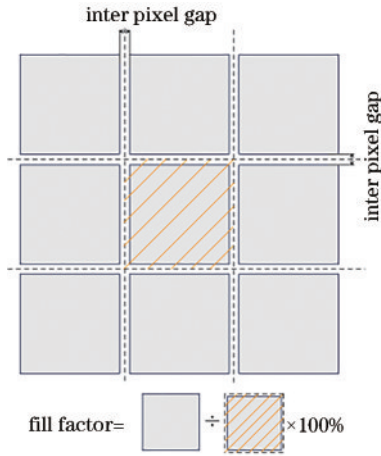


图 2 液晶面板简化模型

Fig. 2 Simplified model of liquid crystal panel

总面积的比值称为填充因子(fill factor),可知填充因子越接近于1,调制程度越高,零级光干扰越弱。

通过在液晶空间光调制器加载不同形式的相位分

布图,均可在傅里叶面上产生多焦点分布。通过直接加载计算全息图,会产生零级光干扰现象,如图3(a)所示;通过在计算全息图基础上叠加闪耀光栅灰度图,实现多焦点分布在X、Y方向上偏离零级光位置,如图3(b)所示;通过在计算全息图基础上叠加菲涅耳透镜灰度图,实现多焦点分布在Z方向上偏离零级光空间位置,如图3(c)所示;图3(d)是将计算全息图更换为达曼光栅灰度图后的去除零级光干扰的示意图,达曼光栅由0、 $\pi$ 相位交替多周期扩展而成,正因为这种二值相位结构,所以部分通过 $\pi$ 相位调制区域出射的调制光束会与未调制的出射光的光程差相差二分之一波长,进而发生相消干涉,消除这一部分在空间上的振幅。聚焦后将不会发生零级光干扰。由于未调制光与调制光间发生干涉,衍射效率下降,但由于调制器的填充因子多大于90%,所使用的日本滨松X13139 LCOSSLM的填充因子为96%,因相消干涉部分对衍射效率的影响,经测量衍射效率的降低程度不会大于10%。

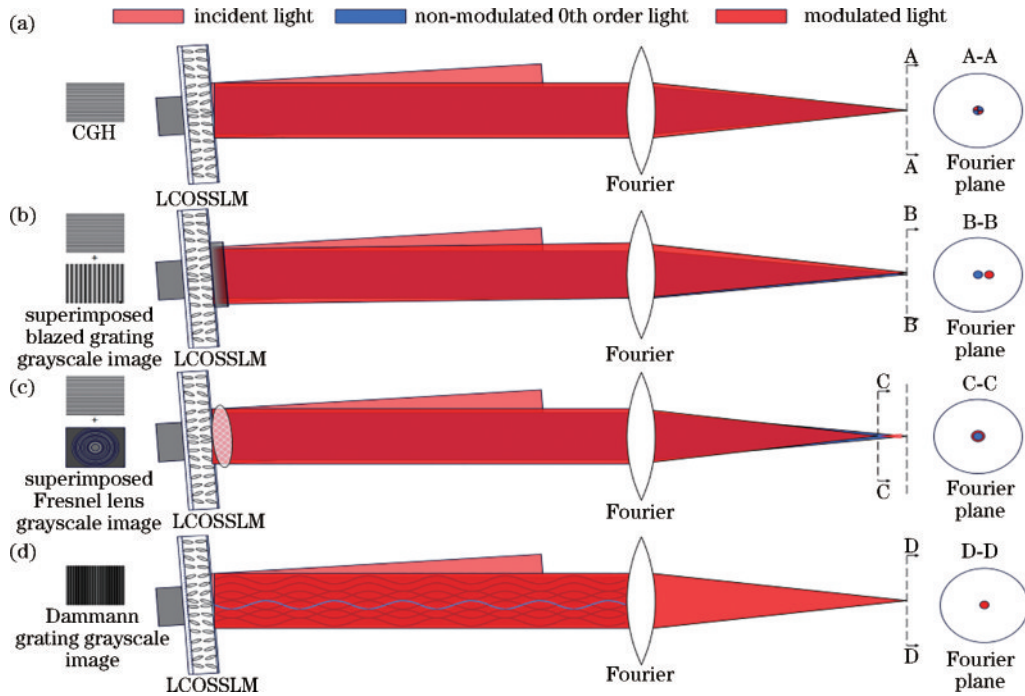


图 3 去除零级光干扰方式。(a)未消除零级光;(b)叠加闪耀光栅灰度图;(c)叠加菲涅耳透镜灰度图;(d)加载达曼光栅灰度图

Fig. 3 Schematic of the way to remove zero-order beam interference. (a) Without removing zero-order beam; (b) superimposed shining grating grayscale map; (c) superimposed Fresnel lens grayscale map; (d) loaded Dammann grating grayscale map

## 2.2 达曼光栅灰度图生成方法

生成达曼光栅灰度图前,需要先设计出所需光栅结构,而达曼光栅结构是由归一化结构多周期扩展而来的,求解归一化周期内的相位转折点集也极为重要。相位转折点集可利用计算机运行优化迭代算法得到求解,迭代前需要有表达式作为载体,即设置一优化评价函数。评价函数需含有衍射效率、均匀度、各衍射级次光强占比等关键参数,本文所用的评价函数的表达式为

$$E^2 = \alpha \left\{ \left[ I_0 - I_E \hat{I}_0 \right]^2 + 2 \sum_{n=1}^N \left[ I_n - I_E \hat{I}_n \right]^2 \right\} + (1 - \alpha)(1 - I_E)^2, \quad (3)$$

式中: $I_n$ 表示各衍射级次的设计光强占比; $\hat{I}_n$ 为各衍射级次的理想光强占比; $I_E$ 表示衍射效率; $\alpha$ 是优化时的补偿函数。式(3)第一部分衡量各衍射级次光强的设计强度与理想强度的差异,第二部分衡量分束后阵列光的衍射效率,所以 $\alpha$ 可以决定两部分的优化迭代权重。

达曼光栅产生分束数对应的有效衍射级次与相位转折点集数量直接存在关系:

$$K = \begin{cases} n + 3, & n < 7 \\ n, & n \geq 7 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)的对应关系为最优关系,但并非绝对关系。以设计一维五分束达曼光栅结构为例,最大有效衍射级次为 2,即  $K=5$ ,但考虑有  $x_0=0$  和  $x_k=1.0$ ,所以有效变动的相位转折点坐标数量为 3 个。将有效衍射级次对应的 3 个相位转折点坐标以  $x_1, x_2, x_3$  代入式(1)和式(2),并整合代入到式(3)中,保存为优化评价函数。

可以看出,优化评价函数越接近于 0,表示理想的分束效果越好,所以求相位转折点坐标问题变成了评价函数求解最值的问题。通过在 MATLAB 软件内置的优化工具箱 (Optimization Toolbox) 中调用优化评价函数,选择模拟退火算法,并设置好优化迭代前的参数。图 4 为利用模拟退火算法迭代求解的达曼光栅归一化周期内的相位转折点集,以及在求解结果基础上编写脚本文件,通过矩阵填充、多周期扩展流程生成的灰度图形式。模拟退火算法为全局优化算法,可以快速迭代出最值。

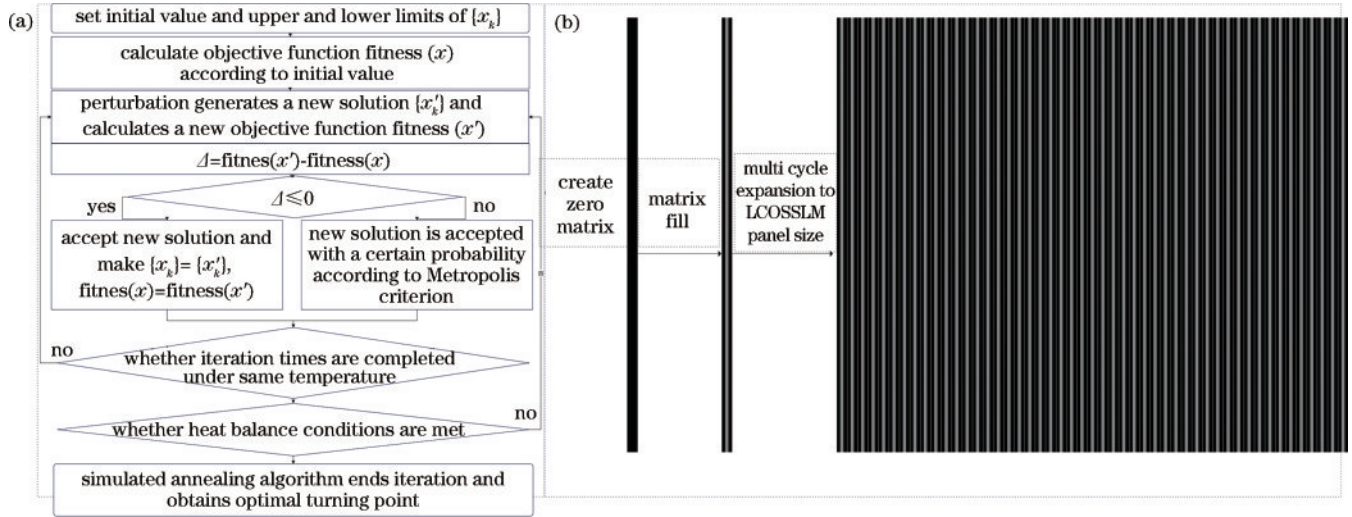


图 4 达曼光栅灰度图生成流程。(a)使用模拟退火算法结合优化评价函数求解的归一化周期内的相位转折点集;(b)通过矩阵填充、多周期扩展生成的灰度图形式

Fig. 4 Dammann grating grayscale map generation process. (a) using simulated annealing algorithm combined with optimal evaluation function to solve the set of phase turning points within the normalized period; (b) grayscale map form generated by matrix filling and multi-period expansion

从 MATLAB 软件的优化工具箱中选择模拟退火算法,进行相位转折点坐标的初始值、上下限设置,并依次对迭代参数进行设置,根据图 4(a),使用模拟退火算法进行流程对应的优化迭代操作,最终求解出优化评价函数的最值,对应的归一化周期内的相位转折点坐标分别为 0.03861、0.389、0.6537。后按照图 4(b),可将达曼光栅归一化结构转换为 LCOSSLM 所需的相位分布图形式。首先根据需求确定光栅单周期长度,若多焦点分布为 X 方向,则在 MATLAB 中创

建一个长为单周期长度对应像素数、宽为液晶面板对应宽度像素数的零矩阵,反之亦然;根据 LCOSSLM 内部转换关系,以 0~255 灰度级对应 0~ $2\pi$  相位调制量进行矩阵填充,将矩阵多周期扩展至液晶面板长度;最后按照八位灰度图形式导出 BMP 图像。若要生成二维多焦点分布,则需要将一维达曼光栅灰度图转换为二维形式。图 5 为生成二维多分束达曼光栅灰度图流程,具体是对一维多分束分布的灰度图和垂直方向分布、尺寸相等的灰度图进行判定后赋值。赋值规则

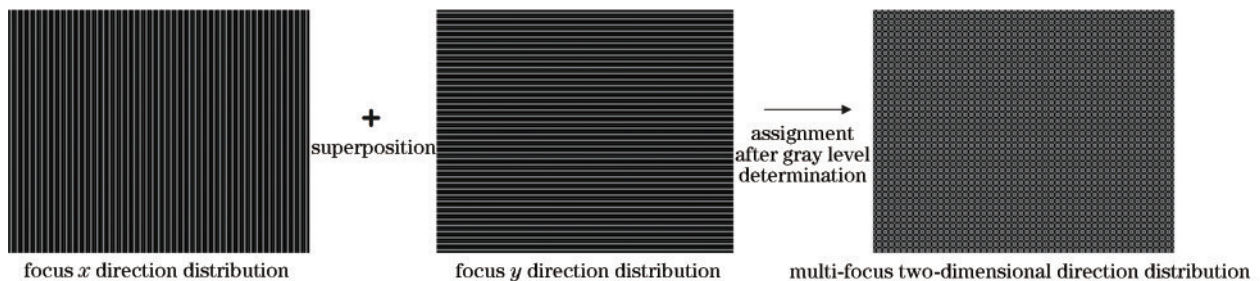


图 5 二维达曼光栅灰度图形式生成方法

Fig. 5 2D Dammann grating grayscale map form generation method

为:若两幅图在同一像素上的灰度值相同,则将位置上的像素赋值为 $\pi$ 相位调制对应的灰度值大小;若两幅图在同一像素上的灰度值不相同,则赋值为0相位调制对应的灰度值大小。

### 2.3 误差分析

使用 VirtualLab 对达曼光栅设计结构进行仿真模拟,将理想结构转换为像素化结构对分束均匀度进行误差分析。所用的 LCOSSLM 的单像素尺寸为  $12.5\ \mu\text{m}$ 。依次在 VirtualLab 中的光学设置界面选择转折点列表光栅 (transition point list grating) 进行结构参数设置,设置光源波长为  $1030\ \text{nm}$ 。光栅基底为熔融石英。根据所需多焦点阵列光间距,设置奇偶型光栅的周期长度。转折点坐标以求解的归一化周期内的相位转折点为初始设置。调制深度为  $1144.44\ \text{nm}$ 。误差分析中,研究多焦点阵列光间距改变对分束均匀度的影响规

律。分束均匀度的定义为

$$R_{\text{uni}} = 1 - \frac{\max(I_n) - \min(I_n)}{\max(I_n) + \min(I_n)}, \quad (5)$$

式中: $I_n$ 表示衍射级次对应的光强,即分束均匀度体现各衍射级次间的光强一致性情况。将一维五分束和六分束的达曼光栅设计结构转换为像素化结构,进行了误差分析,结果如图6所示。对于奇、偶数型光栅,依次改变周期长度,对多焦点阵列光间距每隔  $5\ \mu\text{m}$  进行模拟,记录各衍射级次光强占比,并使用式(5)计算分束均匀度。由图6可以看出,理想光栅结构的分束均匀度随焦点间距改变几乎不受影响,而像素化光栅结构的分束均匀度随焦点间距变化有一定程度的变化,且奇数型受到的影响比偶数型要明显。分析原因是对于像素化后的长度,需要按照单像素尺寸的整数倍进行四舍五入就近取整,从而在单周期长度和调制宽度上都有误差引入。

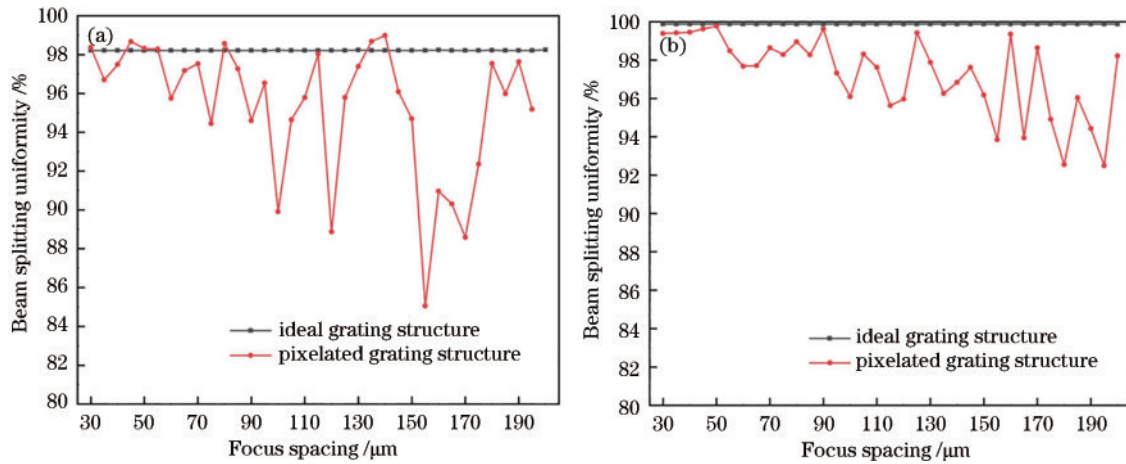


图6 达曼光栅的理想结构与像素化结构的分束均匀度随焦点间距的变化。(a)一维五分束奇数型;(b)一维六分束偶数型

Fig. 6 Change of the beam splitting uniformity of the ideal structure and the pixelated structure of the Dammann grating with the focus spacing. (a) One-dimensional quintuple beam odd type; (b) one-dimensional sixfold beam even type

## 3 实验

### 3.1 实验装置

所用实验装置如图7所示,在光学平台上搭建了基于 LCOSSLM 的激光分束验证系统。其中,实验光源由立陶宛 Light Conversion 的红外飞秒激光器提供,中心波长为  $1028\ \text{nm}$ ,最小脉宽为  $290\ \text{fs}$ 。出射光首先

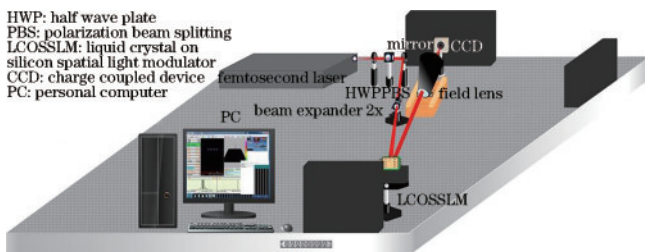


图7 激光分束验证系统的实验装置图

Fig. 7 Experimental device diagram of laser beam splitting verification system

经过二分之一波片(HWP),通过旋转偏振光的偏振方向,改变P光和S光占比。然后经偏振分光棱镜(PBS)仅让P光沿光轴出射,P光通过镀LIDT介质膜的  $1030\ \text{nm}$  反射镜改变方向。激光束经2X扩束镜得到扩束准直,继续传输至 LCOSSLM 的液晶面板处。采用的是日本 Hamamatsu 公司的 X13139 系列 LCOSSLM,分辨率为  $1272\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$ ,单像素尺寸为  $12.5\ \mu\text{m}$ 。经过调制后的激光束会到达焦距为  $167\ \text{mm}$  的场镜(field lens),该场镜让多衍射级次光在一定视场下能够聚焦在同一平面上。最后,将 CCD 摆放至离焦面处,观察光强分布图像,通过 CCD 观测在非能量集中面的多光点光强分布图像。在能量非集中面处,可更大程度体现零级光的去除效果和分束均匀度的观测。CCD 的分辨率为  $768\ \text{pixel} \times 768\ \text{pixel}$ ,单像素尺寸为  $11\ \mu\text{m}$ 。该光学系统有一 PC 端,安装有 DataRay 软件来观测光强分布,安装有 LcosControl 软件加载灰度图来控制光场调制。

### 3.2 实验结果与分析

实验装置的核心为 LCOSSLM, 而加载至 LcosControl 中的相位分布图形式会决定对入射光束的调制效果。为了验证达曼光栅灰度图可以在相位调制的同时去除零级光干扰, 预先准备 3 种相位分布图形式, 分别为 LCOSSLM 适配软件 LcosControl 内置迭代傅里叶变换算法 (IFTA) 生成的 CGH、GSW 算法生成的光栅形式 CGH、达曼光栅灰度图。IFTA 不断在时域和频域中进行变换, 变换中利用目标光强分布的振幅, 直至振幅值与目标振幅值相近停止迭代, 此时的相位分布就是迭代出的 CGH。GSW 算法是在 IFTA 的基础上进行改进得到的, 即为 Gale-Shapley (GS) 加权算法, 使用原光场振幅与计算实际光场振幅的加权值取代原有的振幅分布, 克服了 IFTA 易陷入局部最优解的缺陷, 迭代出的 CGH 对光场调制效果更优。达

曼光栅灰度图是按照达曼光栅结构所设计并转换为灰度图形式完成的。依次将 3 种相位分布图加载至 LCOSSLM 中, 结果如图 8(a)~(c) 所示。此处 CCD 观测的多光点光强分布的分束均匀度, 是利用 CCD 适配软件 DataRay 导出的光强 ADC 值-位置关系曲线, ADC 值表示光强, 是根据式 (5) 进行计算获得的。可以看出: 通过 LcosControl 内置的 IFTA 直接迭代的 CGH 对光束调制后形成的多光点分布存在有未调制光形成的零级光干扰; 通过 GSW 算法迭代生成的光栅形式 CGH 对光束调制后形成的多光点分布明显消除了零级光干扰, 但因为光栅形式相位结构分布存在有一定的杂散光影响, 经测量均匀度为 94.86%; 加载的达曼光栅灰度图对光束调制后形成的多光点分布有效去除了零级光干扰现象, 并且均匀度方面也很优异, 经测量均匀度为 97.19%。

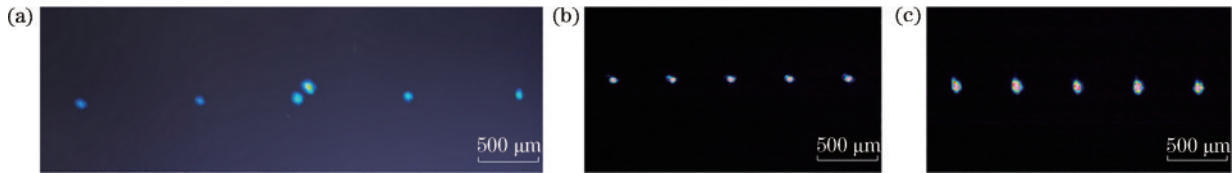


图 8 加载不同方式生成的相位分布图形式产生的多光点分布光强图像。(a)IFTA 生成的 CGH;(b)GSW 算法生成的光栅式 CGH;(c)达曼光栅结构转换的灰度图形式

Fig. 8 Multiple light point distribution light intensity images generated by loading phase distribution maps generated in different ways. (a) CGH generated by IFTA; (b) CGH in grating form generated by GSW algorithm; (c) grayscale map form transformed by Dammann grating structure

图 9 为加载达曼光栅灰度图依次生成的一维两分束、七分束及二维两分束多光点分布光强图像, 光强图像右侧为对应的光强 ADC 值-位置关系曲线, 经计算得分束均匀度分别为 98.453%、96.820%、95.436%, 表明加载达曼光栅灰度图生成一维和二维多光点分布时均未发现零级光干扰现象, 且分束均匀度优异。

通过将产生 500 μm 阵列光间距的一维多分束达曼光栅灰度图依次加载至 LcosControl 中, 设置 CCD 的增益和曝光时间均为最小值, 在 DataRay 中观测到了 CCD 视场内多光点光强分布图像, 导出视场内的数据记录, 并计算分析出一维偶、奇数分束下各衍射级次的光强占比及分束效果, 结果如表 1 和表 2 所示。

表 1 一维偶数分束下各衍射级次的光强占比及分束效果

Table 1 Proportion of light intensity at each diffraction level and beam splitting effect under one-dimensional even beam splitting

Number of beam splitting	Proportion of effective diffraction order light intensity / %						Diffractive efficiency / %	Uniformity / %
	-5	-3	-1	+1	+3	+5		
2			41.093	41.639			82.731	99.340
4		18.478	18.502	17.862	18.382		73.224	98.240
6	13.136	12.324	11.294	12.511	11.891	12.327	73.483	92.461

表 2 一维奇数分束下各衍射级次的光强占比及分束效果

Table 2 Proportion of light intensity at each diffraction level and beam splitting effect under one-dimensional odd beam splitting

Number of beam splitting	Proportion of effective diffraction order light intensity / %							Diffractive efficiency / %	Uniformity / %
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3		
3			23.814	25.525	23.293			72.632	95.428
5		15.093	16.089	13.885	15.939	15.003		76.000	92.675
7	12.471	12.607	12.798	13.053	13.868	12.347	13.364	90.509	94.167

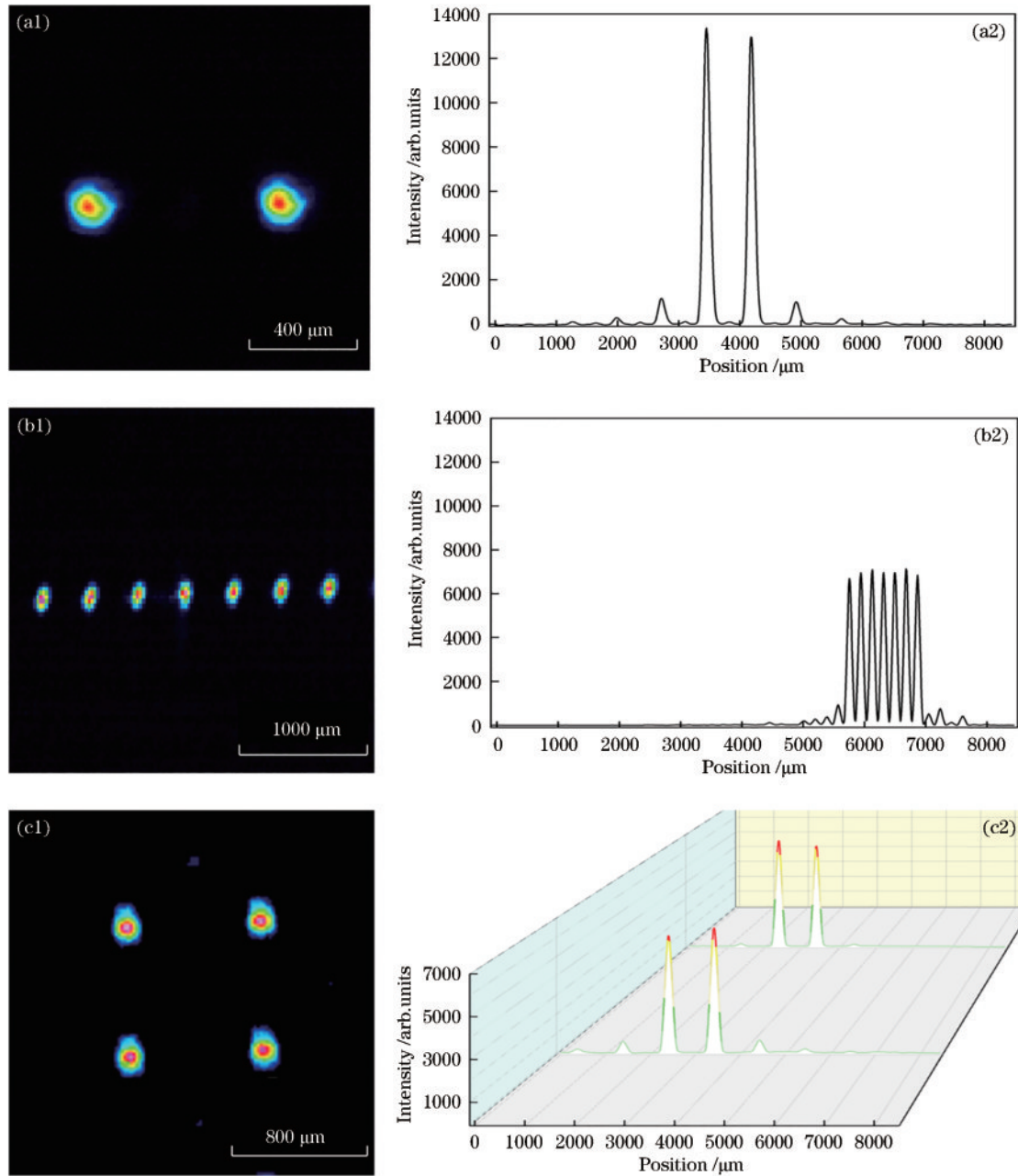


图9 加载达曼光栅灰度图产生的多光点分布光强图像及分束效果曲线。(a1)(a2)一维二分束;(b1)(b2)一维七分束;(c1)(c2)二维二分束

Fig. 9 Multifocus distribution light intensity images and fractional effect curves generated by loading Damman grating grayscale map. (a1)(a2) one-dimensional dual-beam; (b1)(b2) one-dimensional seven-beam; (c1)(c2) two-dimensional dual-beam

## 4 结 论

为了在使用液晶空间光调制器产生激光分束的同时去除零级光干扰,设计了将达曼光栅结构转换为灰度图形式的流程。将生成的达曼光栅灰度图加载至基于硅基液晶空间光调制器的激光分束验证系统中,相比IFTA迭代生成的计算全息图,加载达曼光栅灰度图实现了相位调制的同时去除零级光干扰;相比GSW算法迭代生成的计算全息图,去除杂散光更为明显。通过CCD在离焦面上观测多光点分布光强图像,一维二至七分束下均匀度均大于92.461%,二维二分束下

均匀度为95.436%,结果表明均有优异的分束均匀度,且光强分布未受到零级光干扰。

## 参 考 文 献

- [1] Hayasaki Y, Sugimoto T, Takita A, et al. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(3): 031101.
- [2] Gittard S D, Nguyen A, Obata K, et al. Fabrication of microscale medical devices by two-photon polymerization with multiple foci via a spatial light modulator[J]. Biomedical Optics Express, 2011, 2(11): 3167-3178.

- [3] Abshire J B, Harding D J, Sun X L, et al. Pushbroom laser altimetry using fiber lasers and photon counting detectors[C]//2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2007, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [4] 王承邈. 基于液晶光学相控阵的高精度光束指向控制技术[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021: 93-99.  
Wang C M. High-precision beam pointing control technology based on liquid crystal optical phased array [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021: 93-99.
- [5] Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist[J]. Nature Photonics, 2011, 5(6): 343-348.
- [6] 陈琪, 李国俊, 方亮, 等. 亚波长多台阶结构大角度激光分束器设计[J]. 中国激光, 2016, 43(2): 0205006.  
Chen Q, Li G J, Fang L, et al. Design of wide-angle laser beam splitter with sub-wavelength multi-level structure[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(2): 0205006.
- [7] 刘思垣, 张静宇. 基于空间光调制器的超快激光加工原理及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111431.  
Liu S Y, Zhang J Y. Principles and applications of ultrafast laser processing based on spatial light modulators [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111431.
- [8] Rubinov A N. Physical grounds for biological effect of laser radiation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(19): 2317-2330.
- [9] Flynn R A, Birkbeck A L, Gross M, et al. Parallel transport of biological cells using individually addressable VCSEL arrays as optical tweezers[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2002, 87(2): 239-243.
- [10] Herrera-Fernandez J M, Sanchez-Brea L M. Double diffractive optical element system for near-field shaping [J]. Applied Optics, 2011, 50(23): 4587-4593.
- [11] 吴培超, 张晨初, 杨亮, 等. 基于空间光调制器的飞秒激光双模式快速加工[J]. 中国激光, 2018, 45(10): 1001005.  
Wu P C, Zhang C C, Yang L, et al. Femtosecond laser dual-mode rapid fabrication based on spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(10): 1001005.
- [12] 孙长俐. 硅基液晶空间光调制器及液晶滤波器的调制特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019: 1-9.  
Sun C L. Study on modulation characteristics of liquid crystal on silicon spatial light modulator and liquid crystal filter[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019: 1-9.
- [13] 杨亮. 基于空间光调制器的飞秒激光并行加工技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 60-62.  
Yang L. Research on femtosecond laser parallel processing technology based on spatial light modulator [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 60-62.
- [14] Wang C W, Su Y H, Wang J L, et al. Method for holographic femtosecond laser parallel processing using digital blazed grating and the divergent spherical wave[J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 016109.
- [15] Hasegawa S, Hayasaki Y, Nishida N. Holographic femtosecond laser processing with multiplexed phase Fresnel lenses[J]. Optics Letters, 2006, 31(11): 1705-1707.
- [16] 王晓玲, 周哲海, 周丽. 达曼光栅的设计与制作方法探讨[J]. 激光杂志, 2022, 43(2): 15-20.  
Wang X L, Zhou Z H, Zhou L. Research on the Damman gratings design and its fabrication methodology [J]. Laser Journal, 2022, 43(2): 15-20.
- [17] 余日银, 李德洪, 陈东文, 等. 基于达曼光栅耦合的光纤阵列能量传输系统[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0105001.  
She R Y, Li D H, Chen D W, et al. Fiber array energy transmission system based on Damman grating coupling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0105001.
- [18] 周常河. 达曼光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 3-7.  
Zhou C H. Principle and application of Damman grating [M]. Beijing: Science Press, 2017: 3-7.