

激光与光电子学进展

新型 5×5 分束相位型达曼光栅的设计

朱妍, 张锦*, 蒋世磊, 孙国斌, 胡驰

西安工业大学大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 基于夫琅禾费远场衍射理论和达曼(Dammann)光栅设计原理,利用液晶空间光调制器(LCSLM)的相位调制特性设计了产生5×5点阵结构光的相位型光栅。以显示二维Dammann光栅为例,采用模拟退火算法根据预期的光能利用率和光强不均匀性对光栅一个周期内的相位分布值进行优化,设计了5×5点阵Dammann光栅分束结构。然后利用Matlab进行远场衍射仿真,光能利用率可达到79.94%,光强不均匀性可达到13.28%。将光栅结构加载到LCSLM上,得到了光强不均匀性为27.53%、零级衍射光强均匀分布的5×5点阵,且光能利用率达到71.06%。数值模拟及光学实验结果证明了LCSLM可以在结构光再现光学系统中清晰地再现点阵结构光。与传统的结构光相比,设计的结构光在衍射距离发生变化的时候,其点与点之间的间距不发生改变。

关键词 衍射与光栅; Dammann光栅; 液晶空间光调制器; 结构光再现; 衍射结构

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1305002

Design of Novel Type of 5×5 Beam Splitting Phase Dammann Grating

Zhu Yan, Zhang Jin*, Jiang Shilei, Sun Guobin, Hu Chi

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract From the Fraunhofer far-field diffraction theory and Dammann grating design principle, we used the phase modulation characteristics of the liquid crystal spatial light modulator (LCSLM) to design a 5×5 lattice-structured light pair phase grating. By considering the display of a two-dimensional Dammann grating, we used the simulated annealing algorithm to optimize the phase distribution value within one period of the grating with respect to the expected light energy utilization rate and light intensity non-uniformity. Thus, the beam splitting structure of the Dammann grating, which can form 5×5 lattice, is designed. Next, Matlab was used to simulate the far-field diffraction to obtain the light energy utilization rate and unevenness of light intensity reach 79.94% and 13.28%, respectively. The grating structure was loaded on the LCSLM, and a 5×5 lattice with 27.53% light intensity unevenness and uniform distribution of zero-order diffracted light intensity was obtained. Also, the light energy utilization rate reached 71.06%. Numerical simulation and optical experimental results prove that the LCSLM can clearly reproduce the lattice-structured light in the structured light reproduction optical system. Compared with the traditional structured light, the structured light designed in this paper does not change the distance between points when the diffraction distance changes.

Key words diffraction and grating; Dammann grating; liquid crystal spatial light modulator; structured light reproduction; diffraction structure

1 引言

达曼(Dammann)光栅^[1]是一种可以将入射单色光在傅里叶变换的远场处高效率地生成均匀光强点阵的相位型光栅,且能获得一个物体的多重像。随着光计算与光互连技术的迅速发展,Dammann光栅愈发受到重视。Morrison^[2]提出了偶数点阵Dammann光栅概

念,Vasara等^[3]阐述了非正交二维结构Dammann光栅的概念以及提出了对该二维结构的优化设计。作为典型代表,正交二值相位光栅的使用范围广泛,展现出其设计简单、制作工艺成熟、无需精确套准等优点^[4],逐渐形成了高效率显示、大规模点阵分布的发展趋势。

随着计算机技术和光电器件的快速发展,可以通过计算机模拟光在空间中的衍射来计算生成光栅相位

收稿日期: 2021-12-20; 修回日期: 2022-02-09; 录用日期: 2022-02-21

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划(18JS053)、陕西省科技厅重点实验室项目(2013SZS14-P01)

通信作者: *zhangjin@xatu.edu.cn

分布值,由此生成的相位分布图可以加载到空间光调制器^[5]等设备上实现对光的调节,从而在空间中再现结构光。近年来,对衍射元件的设计越来越趋向于小型化,因此,目前结构光的再现分布主要依赖于空间光调制器设备。通过这种实验方法,可以在固定的距离上实现结构的不同尺寸的重建,并且这种实验方法最大的优势是只需要在计算机上变换衍射结构的尺寸,相比于传统的光刻掩膜版方法大大提高了衍射结构的再现速度与质量。当前主流空间光调制器主要是液晶材料的相位型空间光调制器,这是因为相位型调制具有很高的衍射效率。

Jia 课题组^[6-8]针对圆环形 Dammann 光栅^[9]的需求和应用,基于模拟退火算法提出不同半径的圆孔相位调制,实现了在远场各衍射谱等峰值光强分布的圆环形的衍射场。周丽等^[10]基于理论设计了一种面内旋转对称的新型 5×5 分束 Dammann 光栅,研究并优化了光栅制作中曝光、显影及深刻蚀等关键工艺参数。冷雁冰等^[11]基于严格耦合波理论(RCWA),并采用遗传算法进行优化,设计并制作了一种具有高衍射效率的亚波长结构 Dammann 光栅。现有研究中大部分都是对 Dammann 光栅^[12]的突变点坐标进行优化,缺乏针对光栅的相位分布值的优化设计,以满足形成点阵间距不随衍射距离改变的结构光的要求。故本文在 Dammann 光栅的基础上,采用了模拟退火算法,通过 Matlab 对生成 5×5 点阵的 Dammann 光栅的相位结构进行优化设计,并将其加载到液晶空间光调制器(LCSLM)上作为衍射器件,从而来观察结构光的再现分布。本文利用远场衍射理论设计相位型光栅,其产生的结构光与传统的结构光相比,其不同在于衍射距离发生变化的时候,其间距不发生变化,所以实验时不用移动 LCSLM 的位置,简化了实验操作。

2 基本原理

Dammann 光栅是一种具有不等间距、周期重复的二元相位傅里叶型分束光栅。光栅的相位一般为 0 或 π ^[13],光栅的周期归化为 1。首先考虑振幅型 Dammann 光栅的一个周期结构,振幅透过率函数是周期性的^[14],如图 1 所示。二维 Dammann 光栅是对两个一维 Dammann 光栅进行正交合成,成为一个周期内的二值

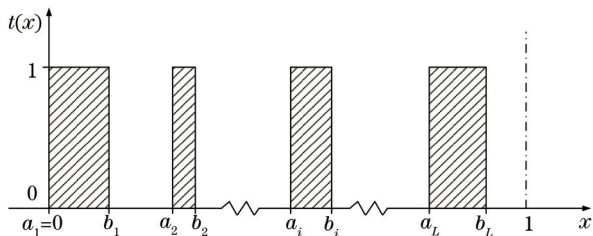


图 1 一维 Dammann 光栅一个周期内的二值振幅

Fig. 1 Binary amplitude of one-dimensional Dammann grating in one period

型相位结构,在此基础上,对一个周期内的二值型相位结构进行相位值的改变得到所需结果如图 2 所示,其中白色部分表示相位为 0,灰色部分表示相位为 π 。

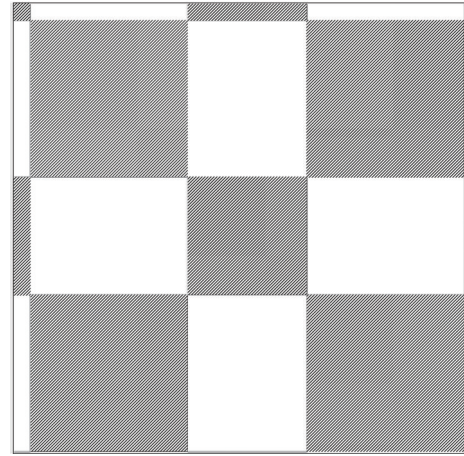


图 2 二维 Dammann 光栅一个周期内的相位结构

Fig. 2 Phase structure of two-dimensional Dammann grating in one period

振幅透过率函数 $t(x)$ 可用傅里叶级数展开为

$$t(x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} T(m) \exp(i2\pi mx), \quad (1)$$

式中: m 表示衍射级次; $T(m)$ 是以突变点坐标表示的光栅的傅里叶系数,即各级衍射级振幅。令光栅相位^[15]为

$$\Phi(x) = \frac{\pi}{2} - \theta + 2\theta \cdot t(x), \quad (2)$$

式中, θ 一般取值 $\frac{\pi}{2}$ 。

定义光能利用率 η 为输出平面所需目标区域内的各点总光强与输出平面点阵区域内所有总光强之比,即

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^{K_0} \sum_{l=1}^{L_0} I_{kl} d\xi d\zeta}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I_{mn} dx dy}, \quad (3)$$

式中: I_{mn} 为输出平面所需目标区域内的第 (m, n) 个像素点的光强; I_{kl} 为输出平面点阵区域内的第 (k, l) 个像素点的光强。目标区域是输出面区域的 5×5 分布的 25 个点阵。

定义光强不均匀性 S_{RM} 为输出平面所需目标区域内各点的最大光强与最小光强之差和最大光强与最小光强之和的比,即

$$S_{RM} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (4)$$

式中, I_{\max} 、 I_{\min} 分别为输出平面所需目标区域内各点的最大光强与最小光强。

设计步骤如图 3 所示。

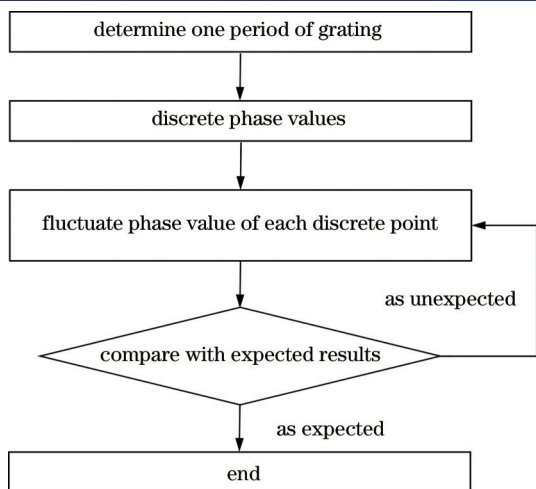


图 3 设计步骤流程图

Fig. 3 Flow chart of design step

3 仿真分析

以 5×5 分束为例,周期设为 0.18 mm×0.18 mm;每个小单元口径为 0.018 mm×0.018 mm,光栅结构尺寸为 7.2 mm×7.2 mm;归一化相位突变点坐标设置为 0.03864、0.38588 和 0.65256,其对应的二维振幅型 Dammann 光栅的光能利用率为 64.83%,光强不均匀性为 33.21%;预期光能利用率设置为 80%,预期光强不均匀性 S_{RM} 设置为 4%。设计方法是在已知二值相位光栅的基础上对一个周期内的相位值进行离散处理,分别对每个离散点的相位值在原有二值相位光栅的基础上进行波动,直到达到预期的要求为止。目前进行光栅优化设计的一种有效方法是模拟退火算法,其方法是引入 Metropolis 准则^[16],通过模拟晶体退火结晶过程,根据预期的光能利用率和光强不均匀性对光栅一个周期内的相位分布值进行优化,计算衍射场的光强分布,使其接近预期的光能利用率并满足光强不均匀性要求。预期光能利用率一般设置为 75%~90% 之间。预期光强不均匀性 S_{RM} 一般设置为 2.1%~20.0% 之间。通过优化计算得到理论上的光能利用率为 79.94%,光强不均匀性为 13.28% 的 5×5 点阵光栅结构如图 4 所示。仿真的结构光分布如图 5 所示。

LCSLM 的工作原理是利用液晶分子所具有的旋光偏振特性和双折射性,在外加电压控制之下,通过改变液晶分子的指向来改变液晶材料的折射率,最终实现对光波的空间调制^[17]。调制过程结合滤波、CCD 采集、计算机实时控制加载电压等一系列方法来完成。实验装置如图 6 所示。

图 6 中 1 为波长为 650 nm 的激光器,用作实验光源,2 为起偏器,3 为透过率为 5% 的衰减片,4 为 LCSLM(透射式,分辨率为 1024 pixel×768 pixel,像素尺寸为 18 μm,填充因子为 57%),5 为 CCD 相机(分

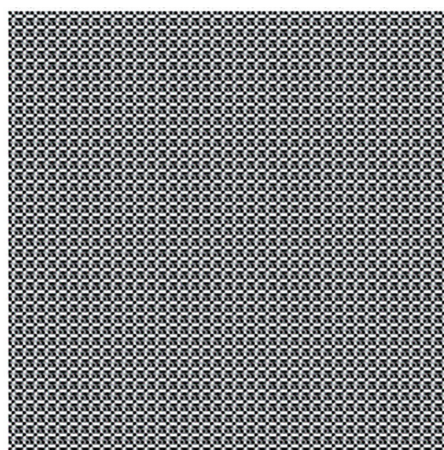


图 4 5×5 点阵光栅结构

Fig. 4 Structure of 5×5 lattice grating

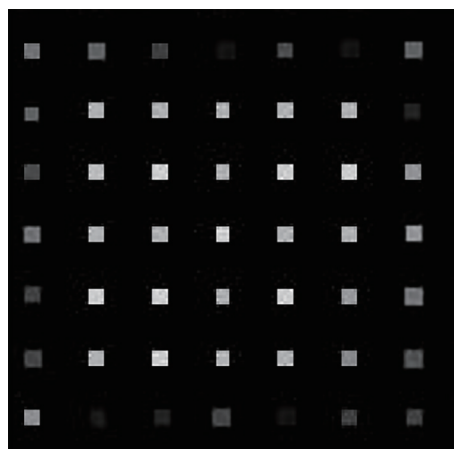


图 5 结构光分布的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of structured light distribution

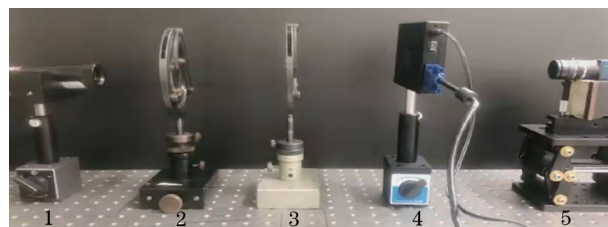


图 6 基于 LCSLM 的结构光再现实验实物图

Fig. 6 Physical image of structured light reproduction experiment based on liquid crystal spatial light modulator

辨率为 2592 pixel×1944 pixel,像素尺寸为 2.2 μm)。搭建好如图 6 的衍射光路后,通过计算机把设计好的衍射结构加载到 LCSLM 上,调节数字相机 CCD 的成像参数并通过数据线把采集到的结构光再现分布传输到计算机中进行观察。

将点阵 Dammann 光栅结构加载到 LCSLM 上,输出面上获得衍射距离为 30 cm 时的 5×5 点阵结构光各点光斑相对强度见表 1。实验使用的 LCSLM 在未加载任何相位结构的情况下可以视为是一个分束光栅,加载相位结构后,原分束光栅产生的光强与加载相位

表 1 衍射距离 30 cm 时 5×5 光斑相对强度

Table 1 5×5 relative intensity of light spot at diffraction distance of 30 cm

Relative intensity				
0.27442	0.27183	0.26119	0.26355	0.28046
0.32520	0.45845	0.28613	0.30271	0.30116
0.29356	0.35450	1.00000	0.34412	0.34244
0.29093	0.37278	0.28986	0.31163	0.28142
0.26664	0.28873	0.26059	0.27171	0.26052

结构后产生的光强会发生叠加。所以当利用 LCSLM 来进行实验验证时,需要考虑未加载相位结构时输出面上的衍射图样和加载相位结构时输出面上的衍射图样的重合部分,除去原分束光栅产生的光强得到光能利用率 η 为 71.06%,光强不均匀性 S_{RM} 为 27.53%。图 7 为不同衍射距离下的 5×5 点阵结构光的分布。

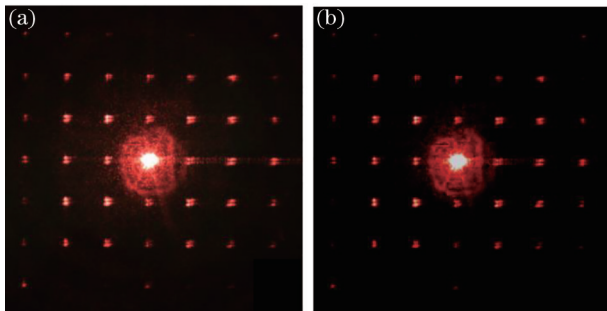


图 7 不同衍射距离下的 5×5 点阵结构光的分布。(a)衍射距离为 30 cm;(b)衍射距离为 50 cm

Fig. 7 Distributions of 5×5 lattice structured light at different diffraction distances. (a) Diffraction distance is 30 cm; (b) diffraction distance is 50 cm

通过对比图 7 中两个不同衍射距离下 5×5 点阵结构光分布示意图,可看出随着距离的不同,点阵之间的间距不会产生变化,因为在夫琅禾费远场条件下,在一定变化范围之内,衍射距离的改变,对输出结果产生的影响很小。

4 结 论

提出以 Dammann 光栅结构作为调制型光栅分束器结构的载体,根据预期的光能利用率和光强不均匀性对光栅一个周期内的相位分布值进行优化,计算衍射场的光强分布,使其接近预期的光能利用率并满足光强不均匀性要求,完成对光栅结构的设计。在归一化坐标不变,未优化相位结构时,由一维 Dammann 光栅展开成二维 Dammann 光栅的光能利用率约为 64.83%,不均匀性约为 33.21%,通过优化相位后计算得到理论上的光能利用率为 79.94%,光强不均匀性为 13.28%,且在多点数的情况下效果更会优。将光栅结构加载到 LCSLM 上,得到了不均匀性为

27.53%、零级衍射光强均匀分布的 5×5 点阵,且光能利用率达到 71.06%。虽然实验结果由于损失部分光能而使光能利用率比仿真结果稍微低一些,但是显示效果还是不错的。实验证明,采用夫琅禾费远场衍射理论并优化相位结构可使点阵距离不随衍射距离的改变而改变,适用于测量大型物体。

参 考 文 献

- [1] Dammann H, Görtler K. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms[J]. Optics Communications, 1971, 3(5): 312-315.
- [2] Morrison R L. Symmetries that simplify the design of spot array phase gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(3): 464-471.
- [3] Vasara A, Taghizadeh M R, Turunen J, et al. Binary surface-relief gratings for array illumination in digital optics[J]. Applied Optics, 1992, 31(17): 3320-3336.
- [4] 王鹏鹏. 基于达曼光栅的点阵照明成像激光雷达系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Wang P P. Research on lidar system of lattice illumination and imaging based on Dammann grating[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [5] 王心怡. 基于空间光调制器高效动态生成全矢量光场的研究[D]. 南京: 南京大学, 2018: 34-35.
Wang X Y. Research on efficient and dynamic generation of full vector light field based on spatial light modulator [D]. Nanjing: Nanjing University, 2018: 34-35.
- [6] Zhou C H, Jia J, Liu L R. Circular Dammann grating[J]. Optics Letters, 2003, 28(22): 2174-2176.
- [7] Yu J J, Zhou C H, Jia W, et al. Circular Dammann grating under high numerical aperture focusing[J]. Applied Optics, 2012, 51(7): 994-999.
- [8] Jia J, Zhou C H, Liu L R. Circular Dammann grating and its applications[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4923: 119-126.
- [9] 欧阳君怡, 李中梁, 刘腾, 等. 基于圆环达曼光栅的长焦深光学相干层析成像系统[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2007002.
Ouyang J Y, Li Z L, Liu T, et al. An extended-focus optical coherence tomography system based on circular Dammann grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2007002.
- [10] 周丽, 钟青, 李劲劲, 等. 新型 5×5 分束达曼光栅的设计与制作[J]. 微纳电子技术, 2018, 55(9): 677-682.
Zhou L, Zhong Q, Li J J, et al. Design and fabrication of a novel 5×5 beam Dammann grating[J]. Micronanoelectronic Technology, 2018, 55(9): 677-682.
- [11] 冷雁冰, 董连和, 孙艳军. 1×11 亚波长结构 Dammann 光栅的研制[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 812-817.
Leng Y B, Dong L H, Sun Y J. Study on 1×11 Dammann grating with sub-wavelength structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 812-817.
- [12] 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 Dammann grating coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(1): 0105001.
- [13] 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
Jin G F, Yan Y B, Wu M X, et al. *Binary optics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998.
- [14] 颜树华. 衍射微光学设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
Yan S H. *Design of diffractive micro-optics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011
- [15] 罗风光, 曹明翠, 李洪谱. 大点阵数二维 Dammann 光栅的制作与研究[J]. *半导体光电*, 1994, 15(1): 55-58.
- Luo F G, Cao M C, Li H P. Fabrication and research of large array two-dimensional Dammann grating[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1994, 15(1): 55-58.
- [16] Steinbrunn M, Moerkotte G, Kemper A. Heuristic and randomized optimization for the join ordering problem[J]. *The VLDB Journal*, 1997, 6(3): 191-208.
- [17] 李森森, 吴凡, 吕志伟. 基于液晶空间光调制器的激光近场光束整形[J]. *光电技术应用*, 2017, 32(3): 19-23, 58.
Li S S, Wu F, Lü Z W. Beam shaping of laser nearfield based on liquid crystal spatial light modulator[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2017, 32(3): 19-23, 58.