

文章编号:1002-2082(2020)04-0816-06

基于空间光调制器的光束大角度扫描技术研究

郑新波¹, 张 旋¹, 栾 琳¹, 洪汉玉²

(1. 深圳光启高等理工研究院 深圳超材料技术光电应用工程实验室, 广东 深圳 518000;
2. 武汉工程大学 电气信息学院, 湖北 武汉 430073)

摘要: 为实现一束激光在 90° 锥形范围内的扫描, 利用液晶空间光调制器在光束偏转控制时精度高、无机械惯性等优点, 研究并建立了基于液晶空间光调制器的光束偏转和角放大光路系统。提出了空间光调制器的可编程相位调制算法和角放大光路结构, 推导了空间光调制器光束偏转角度与相位灰度驱动图的关系, 设计了角度放大倍率高于 22 倍的角放大光路系统。在此基础上, 建立了光束扫描控制实验系统, 对该装置角度出射范围进行了测量, 将实际的角放大倍率与设计值进行对比。实验结果表明: 研制系统的出射视场角可达 91.22°, 并可通过畸变校正实现出射视场角范围内的规则形状扫描。该研究在光束敏捷控制、无线激光通信、目标搜索与追踪等领域具有重要的研究价值和应用前景。

关键词: 空间光调制器; 相位调制; 光束扫描; 角放大光路

中图分类号: TN29; O435.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202041.0409803

Large angle range beam scanning control based on crystal spatial light modulator

ZHENG Xinbo¹, ZHANG Xuan¹, LUAN Lin¹, HONG Hanyu²

(1. Key Laboratory of Metamaterial Technology Photoelectric Application Engineering,
Kuang-chi Institute of Advanced Technology, Shenzhen 518000, China;
2. School of Electrical Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: In order to realize the laser scanning control within 90° cone angle, a beam deflection and angle amplification optical path system based on LCSLM (liquid crystal spatial light modulator) were researched and established by using the advantages of high precision and no mechanical inertia in beam deflection control. The programmable phase modulation algorithm and angle amplification optical path structure of spatial light modulator was proposed. The relations between the beam deflection angle of spatial light modulator and the phase gray scale driving diagram was derived, and the angle amplification optical path system with an angle magnification ratio higher than 22 times was designed. On this basis, the experimental system of beam scanning control was established, the angle emergence range of the device was measured, and the actual angle magnification ratio was compared with the designed value. The experimental results show that the emergence field angle of the developed system can reach to 91.22°, and the regular shape scanning within the range of emergence field angle by distortion correction can be realized. This research has important research value and application prospect in the fields of beam agile control, wireless laser communication, target search and tracking.

Key words: spatial light modulator; phase modulation; beam scanning; angle amplification optical path

引言

光束偏转及扫描精密控制在无线激光通信、

目标定位及追踪、微粒子捕获等领域具有重要的

应用价值^[1-2]。传统的光束偏转通常采用万向节、

收稿日期:2019-11-18; 修回日期:2019-12-26

基金项目:深圳市海外高层次人才创新创业专项资金 (KQE201106020031A)

作者简介:郑新波 (1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事光电成像系统技术研究。E-mail: zxb1984_0@163.com

扫描振镜、旋转多面镜等机械装置实现, 难以避免“热漂移”、机械惯性等缺陷, 导致光束控制响应速度差、重复性误差高, 同时机械装置能耗高、体积大、质量大, 极大地限制了它的性能和应用领域^[3-4]。采用无机械惯性的装置实现光束高速扫描控制具有重要意义。

液晶空间光调制器 (liquid crystal spatial light modulator, LCSLM) 是一种高分辨率、数字化可编程的衍射光学元件, 具有质量轻、体积小、功耗低、无机械惯性、可避免重复加工光学元件等优点, 可以通过加载的驱动信号对光波前进行灵活、连续的调制, 包括相位、振幅、偏振态调制等^[5-7]。纯相位电寻址的 LCSLM 只对光波波前的相位进行调制, 具有空间分辨率高(像素独立)、相位分辨率高、无运动部件、驱动电压低、动态可控等优点, 更可以同时实现多束分光的偏转控制, 是公认的目前光束控制领域最有前景的发展方向之一^[8-10]。

1 纯相位 LCSLM 实现光束偏转控制

1.1 LCSLM 相位调制原理

LCSLM 将液晶层作为调制材料, 基于液晶分子的电场特性, 通过改变液晶层的电场分布, 从而控制出射光波的相位延迟, 实现波前相位调制, 这是电寻址 LCSLM 进行相位调制的基本原理^[11]。LCSLM 从结构上可分为透射式和反射式, 本文研究并使用反射式 LCSLM 实现光束偏转控制。

反射式 LCSLM 的受控单元为独立的像素单元, 可以提供高分辨率、单独像素寻址的高速相位调制。对垂直入射的光束施加倾斜的相位延迟, 即可改变光束的出射角度^[12-13], 考虑 LCSLM 的像素离散化, 可形成以 2π 相位为模的阶梯形相位延迟分布, 如图 1 所示。

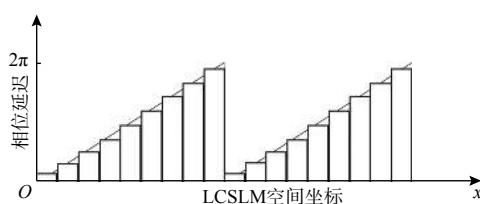


图 1 LCSLM 周期性相位延迟分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of periodic phase delay on LCSLM

1.2 光束偏转控制算法

在利用 LCSLM 实现对入射波前的相位调制时, 需要根据所需的调制量计算出相应的相位灰

度驱动图, 驱动图中每个像素的灰度值表示相位调制量, LCSLM 加载该相位驱动图就可以控制每个像素实现需要的相位延迟, 从而实现对入射光波的相位调制。

本文使用 LCSLM 为 Thorlabs 公司生产的 EXULUS-HD1 纯相位硅基液晶空间光调制器, 可提供分辨率 1920×1080 像素、单独像素寻址的高速反射式相位调制。

激光准直光束入射在 LCSLM 液晶面板上, 通过相位调制实现在 XY 接收屏上的二维偏转, 如图 2 所示。假设所需的出射光束偏转角度为 (α_x, α_y) , α_x, α_y 分别是光束在 x 方向和 y 方向的偏转角度, 则 α_x, α_y 可以通过(1)式转换为经调制之后的光束传播方向向量。

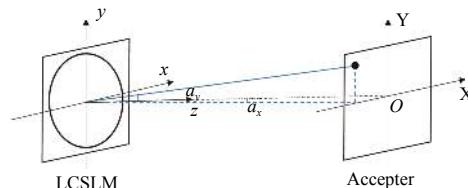


图 2 光束偏转角度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of beam deflection angle

$$\begin{aligned} \tan \alpha_x &= \frac{l}{n} \\ \tan \alpha_y &= \frac{m}{n} \\ l^2 + m^2 + n^2 &= 1 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: l, m, n 分别是光线在 x, y, z 方向的方向余弦。光束的传播方向向量可以表示为

$$(l, m, n) = n(\tan \alpha_x, \tan \alpha_y, 1) \quad (2)$$

式中 $n = \sqrt{1 - l^2 - m^2}$ 。

LCSLM 平面上 $0 \sim 2\pi$ 的相位对应的空间周期 p 为

$$p = \frac{\lambda}{\sqrt{l^2 + m^2}} \quad (3)$$

由此计算出 LCSLM 的像素坐标 (x_p, y_p) 对应的相位延迟为

$$\phi = \frac{|y_p - k \cdot x_p|}{\sqrt{k^2 + 1} \cdot p} \quad (4)$$

式中: p 为计算出的空间周期; k 为 LCSLM 平面上等相位线的斜率, 可由下式计算:

$$k = \tan\left(90 + \arctan\left(\frac{m}{l}\right)\right) \quad (5)$$

将计算出的相位延迟量进行 2π 回卷处理, 并将相位值转换为灰度值, 即得出需加载给 LCSLM

的相位灰度驱动图。对于波长 633 nm 的入射激光,本文使用的 LCSLM 相位调制范围为 2π , 每个像素所需的相位延迟对应的 0~255 灰度值如(6)式,从而可得出相位灰度驱动图。

$$G = \phi \frac{255}{2\pi} \quad (6)$$

将 LCSLM 看作空间采样器件, 受像素尺寸的制约, 对于单一方向(x 方向或 y 方向)的角度偏转,LCSLM 可以实现的最大偏转角 α_{\max} 为

$$\alpha_{\max} = \arcsin(\lambda/2d_{\text{pixel}}) \quad (7)$$

式中: d_{pixel} 是 LCSLM 单个像素的尺寸。

同时,受 LCSLM 液晶面板尺寸的制约,单一方向可实现的最小角度偏转 $\alpha_{\min_x}, \alpha_{\min_y}$ 分别如下:

$$\alpha_{\min_x} = \arcsin(\lambda/d_{\text{SLMx}}) \quad (8)$$

$$\alpha_{\min_y} = \arcsin(\lambda/d_{\text{SLMy}})$$

式中: $d_{\text{SLMx}}, d_{\text{SLMy}}$ 分别是 LCSLM 有效工作区域的边长。

对于本文所使用的 LCSLM, 当入射激光波长为 633 nm 时, 单一方向可实现的最大偏转角约为 $\pm 2.9^\circ$, x 和 y 方向的光束偏转精度分别为 0.0029° 、 0.0051° 。

设定连续可控的偏转角度(α_x, α_y), 使用 Matlab 计算一系列相位灰度驱动图, 将数据以单帧图片的方式预读入内存, 再以所需的频率加载至 LCSLM, 即可实现光束偏转的精细、连续控制, 以所需方式进行区域扫描^[14]。

2 角放大光路系统

根据上述计算结果, 本文使用的 LCSLM 理论上最大可实现 $\pm 2.9^\circ$ 的角度偏转。为了实现 90° 出射角范围内的光束扫描, 本文设计了角放大光路将 LCSLM 的出射光束进行放大投影。

ZEMAX 中的光路设计如图 3 所示。使用胶合透镜 A 进行光束会聚, 并使用 3 组胶合透镜的组合实现入射光束的偏转功能, 使出射角度范围满足设计要求。



图 3 角放大光学系统

Fig. 3 Optical system of angle amplification

为了保证出射光的功率密度, 以光斑的 RMS 半径为优化函数, 对透镜间距及曲率半径进行优化。

所研制光路系统的入射角与出射偏转角度关系如图 4 所示。图 4 中黑色虚线是斜率为 22 的参照线, 可以看出, 角放大光路对 $0\sim 2^\circ$ 范围的入射角实现了高于 22 倍的角度偏转, 可以满足出射光束 90° 视场角的覆盖范围。光路系统对入射角的放大并非线性, 边缘视场存在一定的畸变。

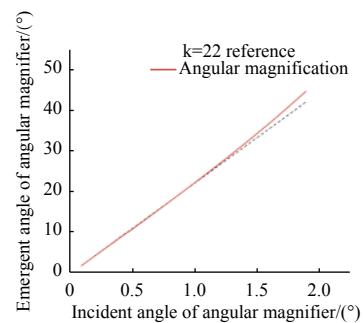


图 4 角放大光路的角放大倍率

Fig. 4 Magnification of angle amplification optical path

3 实验装置

为验证 LCSLM 灰度驱动图的算法以及角放大光路的功能, 设计了光束偏转及扫描实验系统, 系统结构图如图 5 所示, 由光束偏转模块及角放大模块组成^[15]。其中, 光束偏转模块的核心器件是反射式液晶空间光调制器, 角放大模块由前边设计的光路结构组成。激光经扩束镜后, 准直光束经半透半反镜、偏振镜入射到 LCSLM 的液晶面板上进行光束偏转调制, 调制后的光束再经角放大光路系统进行放大投影至接收屏上。根据本文的需求, LCSLM 进行 $0\sim\pm 2^\circ$ 范围内的光束偏转调制, 再经角放大光路最终实现 90° 出射范围内的光束扫描。

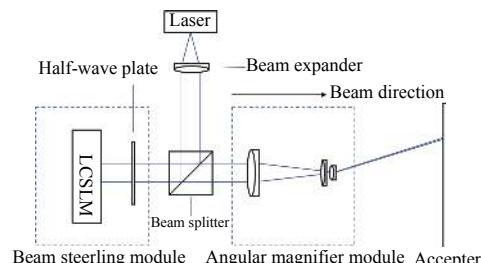


图 5 光束偏转及扫描系统结构图

Fig. 5 Beam deflection and scanning system

根据系统设计搭建了光束偏转及扫描实验装置, 如图 6 所示。其中, LCSLM 采用 Thorlabs 公司

生产的 EXULUS-HD1 型号, 激光器采用法国 Oxxius 公司的 CO-01499D 型号, 波长 633 nm, 功率 100 mW。激光经扩束镜后光斑半径约 20 mm, 经 LCSLM 调制之后实现光束偏转, 并经角放大光路之后照射在接收屏上。接收屏距离光路出射端约 70 cm。

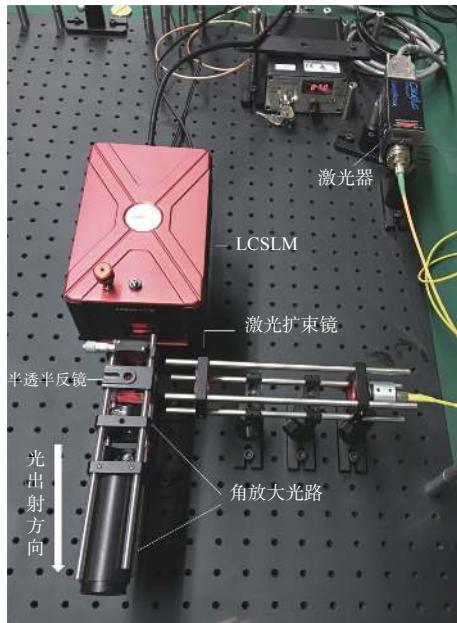


图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental device

为了测量实验装置的角度出射范围, 在接收屏上沿圆周以 45° 间隔设定出射方位, 如图 7 所示。计算 LCSLM 实现各方位 2° 光束偏转的相位灰度驱动图, 依次加载给 LCSLM, 沿逆时针方向实现圆周扫描。

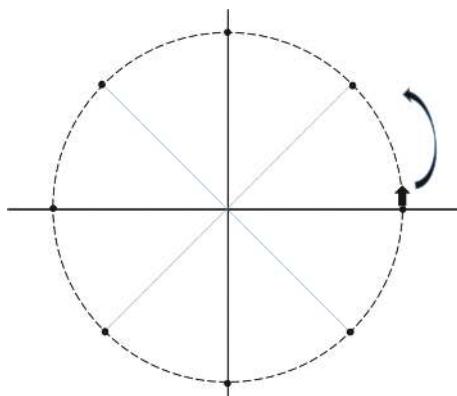


图 7 圆周扫描示意图

Fig. 7 Schematic diagram of circular scanning

对出射光斑在接收屏上的位置进行记录, 3 个方位的激光光斑及对应的相位灰度驱动图如图 8 所示。图 8 中的零级衍射光斑已调整至中心位

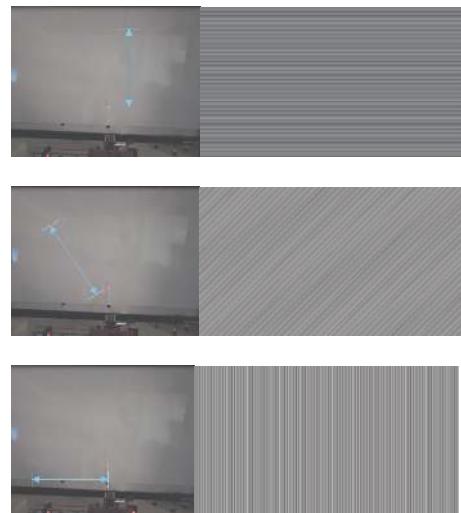


图 8 出射光斑及相位灰度驱动图

Fig. 8 Emergence light spot and phase gray-scale driving diagram

置。测得 3 个方位的光斑距零级衍射光斑的距离约 71.51 cm, 实测出射光束实现了 91.22° 视场角覆盖范围, 满足设计要求。

在此基础上, 控制 LCSLM 依次加载不同偏转角度的相位灰度驱动图, 分别实现 $0.1, 0.2, \dots, 2^\circ$ 的光束角度偏转, 经角放大光路后测量光斑在接收屏上的位置坐标, 从而计算出 LCSLM 的光束偏转角与系统出射偏转角的关系, 将其与 ZEMAX 中的角放大关系进行对比, 如图 9 所示。从图 9 可以看出, 实测的角放大倍率略小于 ZEMAX 的设计结果。根据设计结果, 入射角为 1.85° 即可实现 45° 光束偏转, 实测中, 为实现该出射偏转角, 需要 LCSLM 提供的光束偏转角度约为 2° 。误差产生的主要原因是纯相位 LCSLM 的像素离散化导致实际施加的阶梯型相位延迟与理想的相位延迟存在偏差。此外, 实验装置的光路存在一定的装调误差, 实测过程中也存在测量误差。

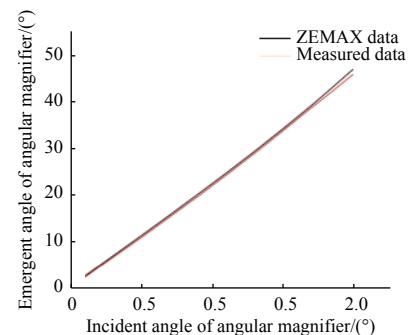


图 9 角放大光路的实测角放大倍率

Fig. 9 Actual angle magnification of angle amplification optical path

对实验装置不同入射视场角的枕形畸变进行了测量, 边缘视场的畸变约 17%, 如图 10 所示。根据测试结果建立了接收屏上的位置坐标与 LCSLM 相位调制的对应关系, 对不同偏转角度的畸变进行了校正。本文以 50 帧/s 的速率实现了接收屏上的区域矩形扫描, 某一行的扫描示例如图 11 所示。

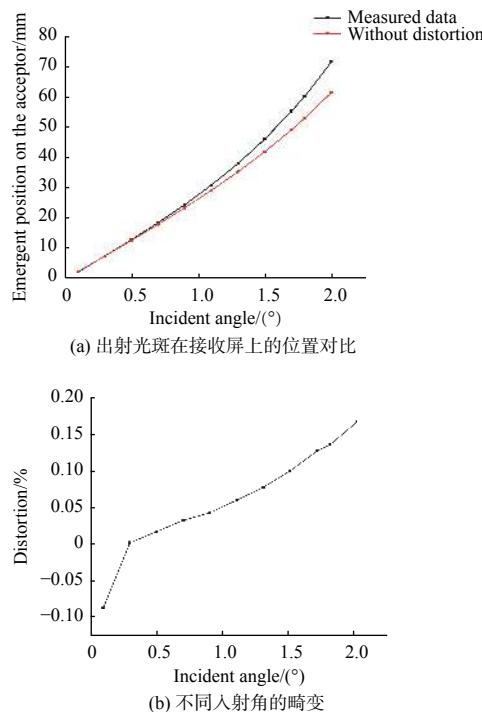


图 10 畸变测量结果

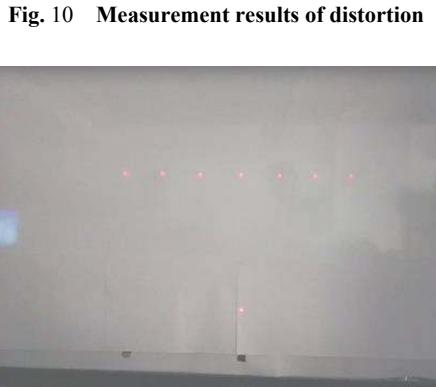


图 11 区域光斑矩形扫描实验结果

Fig. 11 Experimental results of rectangle scanning with area spot

4 结论

本文针对高速、大角度的光束扫描应用需求, 利用纯相位液晶空间光调制器的相位调制特性, 提出了一种实现光束偏转的可编程实时变换算

法, 配合 LCSLM 最大可实现 $\pm 2.9^\circ$ 的光束偏转, 并通过角放大光路实现了 90° 出射角度范围内的光束控制。设计并搭建了实验装置, 对相位调制算法及角放大光路的功能进行了测试。实验结果表明, 装置的出射光束可以实现 91.22° 视场角覆盖范围, 通过实测得出了出射光束偏转角度与入射角的关系, 测得了不同视场角的畸变值, 经畸变校正后实现了接收屏上 50 Hz 的区域矩形扫描, 可以满足下一步激光通信实验响应要求。

同时我们也必须指出, 由于自身实现振幅、相位调制的原理所限, 液晶调制的响应速度是有限的, 通过液晶调制实现光束扫描对于高速振幅调制存在较大限制, 且体积较大, 在要求小型化、高速化的场合存在一定的局限性, 建议其他使用者根据实际应用场景进行合理选型。

参考文献:

- [1] WANG J, YANG J, FAZAL I M, et al. Terabit free-space data transmission employing Orbital angular momentum multiplexing[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6: 488-496.
- [2] HUANG Dajie, FAN Wei, ZHANG Panzheng. Development progress and performance test of optically addressed spatial light modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 223-228.
黄大杰, 范薇, 张攀政. 光寻址空间光调制器研制进展及性能测试[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 223-228.
- [3] GIBSON J L, DUNCAN B D, WATSON E A, et al. Wide-angle decentered lens beam steering for infrared countermeasures applications[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(10): 2312-2321.
- [4] SHI L, SHI J, McMANAMON P F, et al. Design considerations for high efficiency liquid crystal decentered microlens arrays for steering light[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 409-421.
- [5] HU Yongtao, ZHAI Zhongsheng, LYU Qinghua. Parallel processing with femtosecond laser using spatial light modulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(2): 315-320.
胡勇涛, 翟中生, 吕清花. 基于空间光调制器的飞秒并行加工方法研究[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 315-320.
- [6] GAO Yunshu. Research on diffraction effect of LC-SLM and its applications[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
高云舒. 液晶空间光调制器的衍射特性及应用研究[D].

- 北京: 北京交通大学, 2015.
- [7] HORNBECK L J . Spatial light modulator and method: US,4710732[P]. 1987-09-14.
- [8] LIN Peiqiu, YING Chaofu, XU Zhanbin. Implementation of controllable zoom lens based on phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(3): 376-380.
林培秋, 应朝福, 徐展斌. 基于纯位相液晶空间光调制器的可变透镜的实现[J]. 应用光学, 2010, 31(3): 376-380.
- [9] XI Sixing, WANG Xiaolei, HUANG Shuai. Generation of vector beams in terms of the partial light modulator of a twisted nematic liquid crystal[J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(11): 140-146.
席思星, 王晓雷, 黄帅. 基于扭曲向列液晶空间光调制器的矢量光生成[J]. 物理学报, 2015, 64(11): 140-146.
- [10] CHEN Huaixin, SUI Zhan, CHEN Zhenpei, et al. Laser beam shaping using liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1107-1111.
陈怀新,隋展,陈祯培,等. 采用液晶空间光调制器进行激光光束的空间整形[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1107-1111.
- [11] WU Fangjie. The 2D beam shift system based on the spatial light modulator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- 吴方杰. 基于空间光调制器的二维光斑平移系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- [12] YANG He, TONG Shoufeng, ZHANG Lei. Beam deflection control technology based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 78-85.
杨赫, 佟首峰, 张磊. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 78-85.
- [13] WANG Dong. Research on agility control technology of laser beam by using phase-only liquid crystal spatial light modulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
王东. 基于纯相位液晶空间光调制器的激光束敏捷控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [14] LI Dianmeng. Research of confocal scanning method based on phase-only liquid crystal spatial light modulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
李佃蒙. 基于纯相位液晶空间光调制器的共焦扫描方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [15] XIA Jun, CHANG Chenliang, LEI Wei. Holographic display based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Acta Phys. Sin., 2015, 64(12): 7-13.
夏军, 常琛亮, 雷威. 基于液晶空间光调制器的全息显示[J]. 物理学报, 2015, 64(12): 7-13.