

基于二维标量衍射的液晶光束偏转性能仿真

丁 科^{1,2} 齐 波^{1,2}

¹中国科学院光束控制重点实验室, 四川 成都 610209

²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

摘要 液晶空间光调制器(LCSLM)可用于光束偏转,针对一维衍射解析理论分析液晶光束偏转时仅能考虑衍射效率的问题,严格分析二维标量衍射数值方法的采样要求和算法实现,对液晶器件的相位调制级数和非线性进行建模,计算圆形光斑经过液晶器件和聚焦透镜后的光斑空间分布。仿真分析各种条件下液晶器件的衍射效率和偏转精度,得出不同偏转角度时相位调制级数与偏转精度和衍射效率的关系,为液晶器件的选择提供了依据。利用BNS 256×256向列液晶构建光束偏转实验,同时也根据实验参数仿真分析不同偏转角度对应的偏转精度和衍射效率,实验结果与仿真基本吻合,表明二维标量衍射分析可用于液晶偏转器件的工程性能评估。

关键词 光学器件;液晶空间光调制器;光束偏转;标量衍射;偏转精度;衍射效率

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0205005

Beam Steering Performance Simulation of Liquid Crystal Spatial Light Modulator Based on 2D Scalar Diffraction

Ding Ke^{1,2} Qi Bo^{1,2}

¹Key Laboratory of Beam Control of Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

Abstract Liquid crystal spatial light modulator (LCSLM) can be applied to beam steering. Considering that the one-dimensional scalar diffraction analytic method can only solve the diffraction efficiency, two-dimensional scalar diffraction numerical method is introduced and the sampling demand and realization algorithms are strictly analyzed. After phase stages and nonlinearity of LCSLM are modeled, the spatial distribution of circular beam through LCSLM and focus lens is calculated, diffraction efficiency and steering accuracy are simulated with variety of parameters. The relations between the stages and accuracy efficiency with different steering angles are concluded, which can provide choosing basis for liquid devices. Using BNS 256×256 liquid device, the beam steering experiment in which the accuracy and efficiency of different steering angles are researched is established and simulations according to experimental parameters are also done. The experimental and simulation results show good agreement, which demonstrates that two-dimensional scalar diffraction can be used for engineering performance evaluation of LCSLM device.

Key words optical devices; liquid crystal spatial light modulator; beam steering; scalar diffraction; steering accuracy; diffraction efficiency

OCIS codes 050.1380; 050.1950; 050.1960; 070.2580; 260.1960

1 引 言

随着液晶显示和超大规模集成电路技术的迅猛发展,液晶空间光调制器(LCSLM)在空间光束控制中得到广泛应用^[1-6]。作为一种新型可编程控制的衍射光学元件,对其衍射效率和偏转精度的研究尤为重要,目前对于液晶光束偏转的研究基本局限于以一维标量衍射解析理论为基础的简化分析和计算^[7-8],这种计算方

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-10-20

基金项目: 西部之光西部博士专项资助项目

作者简介: 丁 科(1982—),男,博士,助理研究员,主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: 10885681@qq.com

法只能考虑一维衍射效率问题,无法计算液晶相位调制误差(调制级数、线性度)等对偏转精度和衍射效率的影响。针对解析理论的问题,有学者提出了采用一维标量衍射数值方法来分析相位误差造成的精度问题^[9-10],但仍有许多不足。近年来,随着计算机计算速度和容量的扩大,光的二维标量衍射理论和数值计算逐渐完善,已经广泛应用于光场的真空和大气传输,国外基于 Matlab 开发了如 AOTools、WaveProp 等工具箱,基于 C++ 开发了 WaveTrain 等商业软件^[11-13]。本文基于光的标量衍射理论,利用 Matlab 建立了波动仿真工具箱,从商用液晶器件参数出发,详细分析并确定了二维标量衍射应用于液晶光束偏转的采样要求和算法实现,仿真分析了各种条件下液晶器件的衍射效率和偏转精度。同时利用 BNS 256×256 向列液晶构建了光束偏转实验,得到的不同偏转角度对应的偏转精度和衍射效率的实验结果与仿真基本吻合,验证了二维标量衍射用于液晶偏转器件工程评估的可行性。

2 液晶偏转的二维标量衍射仿真

液晶器件的一维标量衍射解析计算相对于实际工况作了如下简化:1) 入射光斑的强度均匀、形状为正方形且充满整个液晶器件,实际一般为圆形、强度均匀或高斯分布光斑;2) 液晶调制相位台阶(相位差)为高度即液晶相位是线性分布,实际液晶相位多呈非线性分布,即台阶并不等高;3) 效率计算为该衍射级上的所有能量,实际由于有限孔径衍射极限的存在,这部分能量在用作聚焦探测时并不能全部利用,通常取几倍衍射极限;4) 只能计算衍射效率,不能按实际器件参数计算由于各种因素造成的偏转精度。这几个问题说明了采用一维衍射解析计算不能很好地满足工程需求。文献[8-9]采用的一维标量数值计算解决了后面3个问题,但仍不能解决第一个问题。从下面的分析可以看出,二维标量衍射数值计算可以很好地模拟上述几个问题,得到一个与实际情况较吻合的仿真结果。

2.1 标量衍射

光的标量衍射理论常用的形式为第一类瑞利-索末菲形式^[14]:

$$U_2(x,y) = \frac{z}{j\lambda} \iint U_1(\varepsilon,\eta) \frac{\exp(jkr_{12})}{r_{12}} d\varepsilon d\eta, \quad (1)$$

式中 $U_1(\varepsilon,\eta)$ 和 $U_2(x,y)$ 分别表示衍射孔径和观测屏上的光场, z 为两者之间的距离, $r_{12} = \sqrt{z^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$ 为衍射点到观察点的距离。标量衍射理论采用了两个近似条件:1) 使用标量衍射理论固有的近似要求,即衍射孔径 $D \gg \lambda$; 2) $z \gg \lambda$ 。当 z 进一步增大可满足菲涅耳近似条件,同时在衍射孔径处放置一焦距为 f 的双曲面透镜,用平面波照明,则 $z=f$ 处的光场分布与夫琅禾费衍射具有完全相同的形式:

$$U_2(x,y) = \frac{1}{j\lambda f} \exp\left(jk \frac{x^2 + y^2}{2f}\right) \iint U_1(\varepsilon,\eta) \exp\left[-j\frac{k}{f}(x\varepsilon + y\eta)\right] d\varepsilon d\eta. \quad (2)$$

(2)式表明,平面波照明,在衍射孔径处放置双曲面透镜可以在焦点位置处观察到衍射孔径的夫琅禾费衍射,且衍射图形的空间扩展程度与透镜的焦距 f 成正比。

2.2 数值计算方法及采样要求

对于存在倾斜相位的二维标量衍射,如果采用快速傅里叶变换(FFT)算法,存在3个问题:1) 源场网格和聚焦光场网格是通过FFT变换引入的空间和频率的关系相互锁定的,首先确定聚焦光场所需要的范围 L_2 和分辨率 d_2 ,根据 d_2 可以确定源场的采样范围 $L_{1,\min} = \lambda f d_2$ 。分析要达到微弧度级别结合实验参数可得 $d_2 = 10 \mu\text{m}$,因此 $L_{1,\min} = 53 \text{ mm}$,结合后面分析的 $d_1 = 2.4 \mu\text{m}$,则需要源场采样数 $N_1 = 22000$;这个数目对于普通的计算机是很难完成任务的;2) FFT 二维采样数目必须保持一致,运算量无法缩减;3) 初始相位上有一个整体倾斜量,而FFT是一个“同原点变换”,如果要包容被偏移的光斑,目标尺寸必须取得较大,进一步增大了计算量。上述问题正好可以通过(2)式所示的直接积分方法克服,这种方法相对于FFT方法的优点是可以在满足采样定律条件下随意地选择变换前后光场的分辨率、点数和位置;缺点是计算量与 N^4 成正比,因此必须根据信号两维的实际带宽实施两维非等间隔采样才能满足实用要求。

对于标量衍射的数值计算,要达到较高的精度,必须满足采样要求,液晶偏转器件叠加的光场是一个二维场,其中发生偏转的一维相位(部分)为如图1(a)所示的台阶图样(偏转角 5.5 mrad);另一维在圆孔范围内为

图1(a)所示相位截面的复制,每个相位截面为直线,相位图就不再给出。常数维的采样按照98%能量范围则确定的采样为圆孔内20个即可,为增加计算精度,仍然将常数维的采样设置成与像素数相同为256;相位台阶维的采样也按照98%能量范围进行确定,得到的频谱图如图1(b)所示,求得一维带宽 $B=2.1 \times 10^5 \text{ m}^{-1}$,按此带宽可确定采样间隔最大为 $2.4 \mu\text{m}$,采样数则取单像元10个即可满足采样要求,最后确定对BNS器件的采样为 256×2560 ,其中2560采样这一维每10个值代表一个像素,因此这10个值是相同的。由于这种建模方式没有考虑一般液晶像素结构带来的“回程”效应^[14],而采用的实验器件对这一回程效应进行了优化,理论计算时按照理想情况进行了建模,但还是要注意优化后的器件仍然有一个如图2所示的“过渡区”^[15],与理想建模还有一定的差距。对于直接积分方法,256×2560个点普通8核计算机的计算时间为60 s,而对于2560×2560如果采用直接积分方法则需要6000 s,不方便工程设计。比较两种采样的计算结果几乎没有差别,说明这种带宽确定的采样方法是合理的。

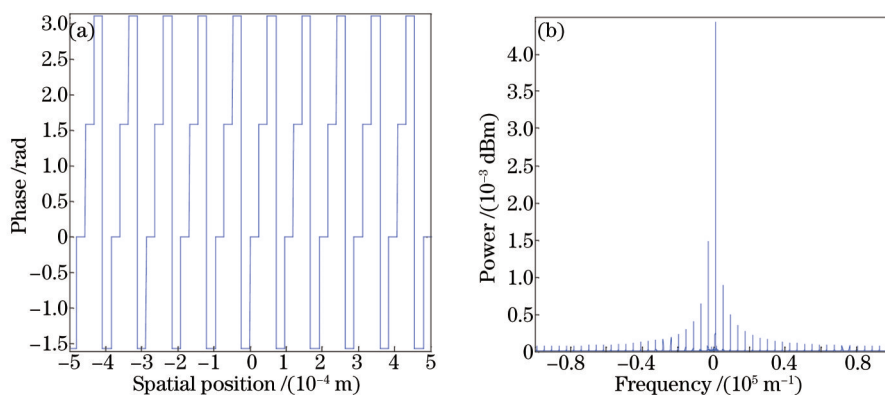


图1 LCLSM 一维光场的(a) 相位图和(b) 频谱图

Fig.1 (a) Phase diagram and (b) frequency spectrum of LCLSM one-dimensional optical field

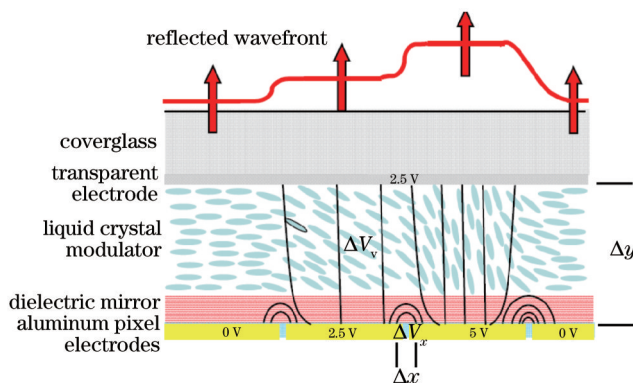


图2 LCLSM 相位过渡区示意图

Fig.2 Sketch map of LCLSM's phase transition zone

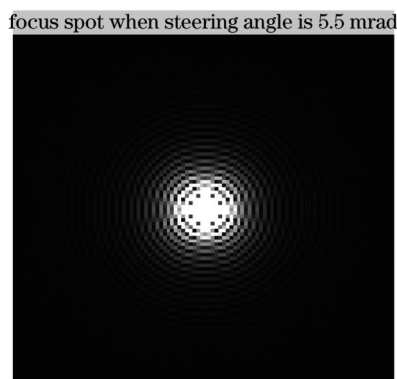


图3 LCLSM 偏转仿真聚焦光斑图

Fig.3 Simulation focus spot diagram of LCLSM

图3是最大偏转角(5.5 mrad)对应的仿真光斑图,图中光斑相对于中心并没有发生偏转,这是因为在算法中设置的理论偏转角为预偏移量,从而缩小了目标范围,减小了计算量。

2.3 液晶相位调制级数和线性度

在液晶调制相位随灰度值变化的曲线中寻找一段近线性 0~2n 调制量区间^[13],此区间所占的级数 m 为液晶相位调制级数,相位随灰度值的变化一般呈非线性关系,为了方便建模仿真,采用相位调制线性度参数 k 为液晶相位调制线性度,得到液晶相位分布为

$$y(i) = \frac{i^k \times 2\pi}{m^k}, \quad (3)$$

式中 $i=1:1:m$,从中可以看出,当 $k=1$ 时,相位是完全线性的;当 $k>1$ 时,相位开始呈现非线性。采用这种方式建模能直观地对系统非线性做一个大致建模,对于实验所用的BNS器件,其仿真参数为 $m=70, k=1.5$ 。

3 液晶偏转实验系统

为验证仿真结果,选择BNS 256×256 XY向列液晶,其像素单元宽度为 $d=24 \mu\text{m}$,激光工作波长为 532 nm,液晶器件偏转特性测试实验光路如图4所示,采用电荷耦合器件(CCD)探测聚焦光斑,CCD像元尺寸为 $5 \mu\text{m}$,透镜焦距为 80 cm。

实验时激光器发出的光经过偏振片后变成线偏振光,经扩束器扩束后到液晶表面,通过施加不同的偏转信号驱动LCSLM获得不同的偏转角,记录CCD输出的像元灰度值以计算光斑质心位置和光斑能量。光斑质心与理论偏转角之比即为偏转精度,光斑能量与全反射(将液晶替换为高反射率反射镜)到CCD时光斑能量的比值即为液晶的偏转效率。

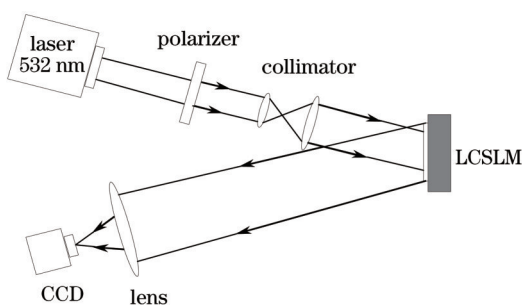


图4 液晶光束偏转实验系统框图

Fig.4 Sketch map of beam steering experiment of LCSLM

4 仿真与实验结果及分析

4.1 液晶相位调制级数与衍射效率和偏转精度的关系

仿真系统建立后,通过改变(3)式中 m 的数值和偏转角度,可以方便地仿真偏转精度和衍射效率与相位调制级数、偏转角度的关系。其中 m 取 3~60;偏转角度分别取 5.5、1.1、0.086 mrad。图5是仿真的偏转精度

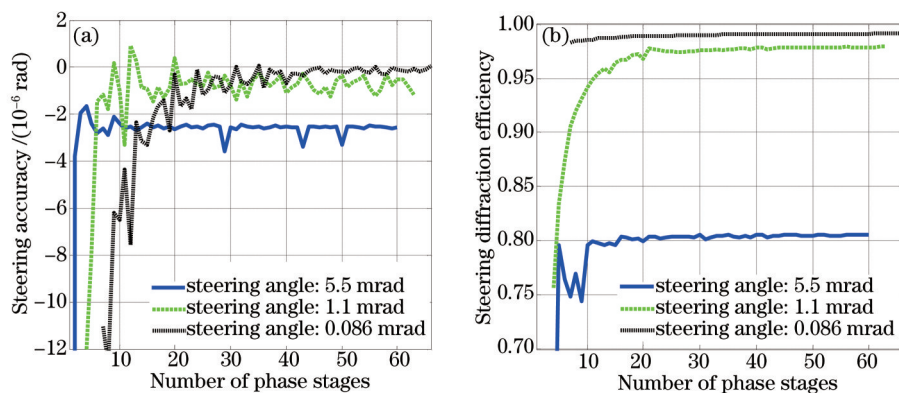


图5 (a) 偏转精度与相位调制级数的关系; (b) 偏转效率与相位调制级数的关系

Fig.5 (a) Steering accuracy versus number of phase stages; (b) steering efficiency versus number of phase stages

和衍射效率与相位调制级数的关系,从图中可以看出相同相位调制级数时,偏转角度越大,偏转精度越差,衍射效率越低;相同偏转角度时,相位调制级数越大,相位精度越高,偏转精度和衍射效率逐渐趋于稳定。从图 5(a)中可以看出对于 5.5 mrad 偏转角,当 $m>10$ 开始趋于稳定;1.1 mrad 对应 $m>20$ 趋于稳定;0.086 mrad 则对应 $m>50$ 才趋于稳定,类似的趋势从图 5(b)中也可以看出。

4.2 偏转精度和衍射效率与偏转角度的关系

图 6(a)是偏转精度与偏转角度的关系,由于相位离散和非线性等造成的相位噪声使得精度在小角度内发生剧烈波动,蓝色实线是仿真结果,可以看出仿真的结果除了有一个波动外,还有一个随偏转角度增大的趋势,黑色点线表示的实验结果也有这个趋势;仿真的偏转角度从 86 μrad (对应相位周期 $N=256$)到 5.5 mrad(对应相位周期 $N=4$),仿真精度优于 3 μrad ;实验结果与仿真结果在约 2.5 mrad(对应相位周期 N 约为 8)之前吻合得较好,之后则出现了偏离。图 6(b)是衍射效率与偏转角度的关系,实测曲线相对于计算曲线存在区别是由于反射率和液晶的相位“回程”造成的。去掉一个常数因子后两条曲线吻合得较好,仅在大角度时有稍微的偏离。从实验结果可以看出,相位周期 $N>8$ 时,仿真结果与实验能较好地吻合;相位周期 $N<8$ 时,仿真结果与实验出现了偏离,随着偏转角度的增大,相位周期越来越短,而没有被建模的“过渡区”占每个相位周期的比例越来越大,影响了仿真结果。

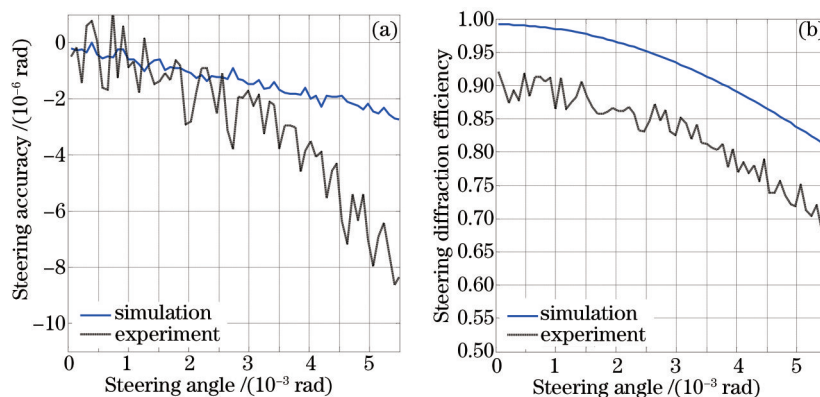


图 6 (a) 偏转精度与偏转角度的关系; (b) 偏转衍射效率与偏转角度的关系

Fig.6 (a) Steering accuracy versus steering angles; (b) steering diffraction efficiency versus steering angles

5 结 论

二维标量衍射应用于精确液晶偏转性能仿真的前提是严格的采样要求、合适的实现算法以及可行的计算时间。通过对实际液晶器件的参数进行建模、根据光场二维信号的频谱特点采用二维非等采样并采用直接积分算法将二维标量衍射应用到液晶偏转性能分析的计算时间降低到可接受的范围,实现了液晶偏转的二维标量仿真。相位调制级数与偏转精度和衍射效率关系的仿真结果表明,不同偏转角度时达到指定精度需要的相位级数,为液晶器件的选择提供了参考依据;偏转精度和衍射效率与偏转角度关系的仿真结果表明,给定器件参数时不同偏转角度能达到的精度和衍射效率,相应的实验结果与仿真结果在相位周期 $N>8$ 时能较好地吻合,说明将二维标量衍射数值方法应用到液晶偏转器件的性能分析是可行的,但对相位周期 $N<8$ 时的仿真需要进一步对液晶器件的相位“过渡区”进行精确建模。

参 考 文 献

- 1 Liu Bohan, Zhang Jian. Dynamical laser beams steering with phase-only spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(7): 899-902.
刘伯哈, 张 健. 纯相位空间光调制器动态控制光束偏转[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 899-902.
- 2 Zhang Cai, Huang Yongmei, Qi Bo, *et al.*. Beam steering control based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0905005.
张 彩, 黄永梅, 齐 波, 等. 基于液晶空间光调制器的光束偏转控制[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0905005.
- 3 Zhuo Jingyi, Kong Lingjiang, Zhou Jianhua, *et al.*. An iteration-based phase retrieval algorithm in liquid-crystal phased array[J]. Acta

- Optica Sinica, 2014, 34(5): 0505001.
- 卓静一, 孔令讲, 周建华, 等. 一种液晶相控阵中基于迭代的相位恢复算法[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0505001.
- 4 Yin Zhe, Liu Guodong, Liu Bingguo, *et al.*. Research on the objective function of spatial light modulator-based output spot focusing for multimode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0705003.
- 尹 哲, 刘国栋, 刘炳国, 等. 基于空间光调制器的多模光纤出射光斑聚焦目标函数研究[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0705003.
- 5 Chen Bo, Yang Jing, Li Xinyang, *et al.*. Phase grating wave-front curvature sensor based on liquid crystal spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 082301.
- 陈 波, 杨 靖, 李新阳, 等. 基于液晶空间光调制器的光栅型波前曲率传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 082301.
- 6 Wang Zheng, Xin Jingtao, Wu Zhiqiang. Accurate measurement of photon orbital angular momentum carried by helical beams through spatial light modulator[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080902.
- 王 铮, 辛璟焘, 邬志强. 利用空间光调制器实现螺旋光束轨道角动量的精确测量[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080902.
- 7 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1231-1235.
- 张翠玉, 黄子强. 二元光学液晶闪耀光栅的特性分析[J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1231-1235.
- 8 Cai Dongmei, Yang Huizhen, Ling Ning, *et al.*. Diffraction effect of liquid crystal spatial light modulator using for beam deflection[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(4): 491-495.
- 蔡冬梅, 杨慧珍, 凌 宁, 等. 液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应[J]. 中国激光, 2008, 35(4): 491-495.
- 9 Emil Hallstig, Lars Sjqvist, Mikael Lindgen. Intensity variations using a quantized spatial light modulator for non-mechanical beam steering [J]. Opt Eng, 2003, 42(3): 613-619.
- 10 Kong Lingjiang, Yi Wei, Yang Jianyu, *et al.*. Reseach on accuracy of liquid crystal phased array component of laser radar[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(5): 1080-1085.
- 孔令讲, 易 伟, 杨建宇, 等. 激光雷达液晶相控阵组件扫描精度分析[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1080-1085.
- 11 J W Goodman. Introduction to Fourier Optics, 3rd ed[M]. Greenwood Village: Roberts & Company, 2005.
- 12 J D Schmidt. Numerical Simulation of Optical Wave Propagation with Examples in MATLAB[M]. Bellingham: SPIE Press, 2010.
- 13 Zhang Hongxin, Zhang Jian, Wu Liying, *et al.*. Wave-front correction using liquid crystal spatial light modulator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(6): 1062-1065.
- 张洪鑫, 张 健, 吴丽莹, 等. 液晶空间光调制器用于波前校正的研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 1062-1065.
- 14 Zhao Xiangjie, Zhang Dayong, Luo Yongquan. Electro-controllable optical beam deflection employing reflective liquid crystal spatial light modulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1324-1328.
- 赵祥杰, 张大勇, 骆永全. 反射式液晶空间光调制器电控光束偏转[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1324-1328.
- 15 100% Fill Factor White Paper. <http://www.haoliangtech.com/UploadText/2008723912540.pdf>

栏目编辑: 张 雁