

文章编号: 0258-7025(2008)04-0491-05

液晶空间光调制器用于光束偏转控制的衍射效应

蔡冬梅^{1,2} 杨慧珍^{1,2} 凌宁¹ 姜文汉¹

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 液晶空间光调制器(LC-SLM)能实现光束动态偏转,而它的像素结构以及相位回卷方法造成的衍射效应使其光效率降低。通过数值仿真和实验分析了像素结构造成的衍射效应,给出了像素填充因子和衍射效率的关系。利用256 pixel×256 pixel的液晶空间光调制器构建动态光束偏转实验装置,使入射光束偏转不同角度时测量远场光斑强度,得到衍射效率随光束偏转角的变化关系。理论分析与实验结果表明,填充比越小,像素结构造成的衍射效应越强,衍射效率降低;当填充比为0.85时衍射效率的测量值仅为51.3%。相位回卷方法使液晶空间光调制器形成类似闪耀光栅结构,随着光束偏转角度的增大,衍射效率降低。

关键词 光学器件;液晶空间光调制器;光束偏转;衍射

中图分类号 O 436.1 **文献标识码** A

Diffraction Effect of Liquid Crystal Spatial Light Modulator Using for Beam Deflection

Cai Dongmei^{1,2} Yang Huizhen^{1,2} Ling Ning¹ Jiang Wenhan¹

(¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A liquid-crystal spatial light modulator (LC-SLM) can be used to deflect laser beam, however its pixel structure and diffraction effect resulted from phase wrapping technique decreases its optical efficiency. The diffraction effect was analyzed theoretically and experimentally, and the relationship between fill factor and diffraction efficiency was demonstrated. 256 pixel×256 pixel liquid crystal spatial light modulator was used to alter the wavefront phase to achieve different deflections of a laser beam dynamically. The far field intensity distribution was measured at different deflection angles. The results show the diffraction efficiency decreases with the fill factor. Its measured diffraction efficiency was only 51.3% when the fill factor is 0.85. The phase wrapping technique make the LC-SLM form the structure asablated grating and its diffraction efficiency decreases with the increase of the deflection angle.

Key words optical devices; liquid crystal spatial light modulator; beam deflection; diffraction

1 引言

目前,控制光束偏转通常采用万向节等机械扫描装置来完成,能耗高、体积庞大、重量大和价格昂贵等缺点限制了它的性能和应用。采用无机械可动部件的扫描装置实现光束控制受到越来越多的关注^[1,2]。近年来,随着液晶显示和超大规模集成电

路技术的迅猛发展以及液晶材料的丰富,电寻址液晶空间光调制器(LC-SLM)在空间光束偏转控制中得到了广泛应用。液晶空间光调制器利用液晶分子的电控双折射效应,通过控制电压的改变,双折射率变化调制入射光波的相位分布^[3~5]。与传统光束控制扫描装置相比,具有无机械可动部件、空间分辨率高、能耗低、体积小、易于控制、价格低廉等优点^[6]。

收稿日期:2007-08-30; 收到修改稿日期:2007-12-03

基金项目:国家自然科学基金(60438030)资助项目。

作者简介:蔡冬梅(1974—),女,山西人,博士研究生,主要从事液晶空间光调制器、自适应光学技术方面的研究。

E-mail: dm_cai@eyou.com

导师简介:凌宁(1935—),女,江苏人,研究员,博士生导师,主要从事自适应光学技术方面的研究。

E-mail: adopse@ioe.ac.cn

作为一种新型可编程控制的衍射光学元件,对液晶空间光调制器的衍射效率的研究尤为重要。Emil Hällstig 等^[7]分析了液晶空间光调制器相位量化分布特点对器件衍射效率的影响。本文利用 256 pixel×256 pixel 的液晶空间光调制器控制入射光束偏转不同角度,测量器件的衍射效率随偏转角度的变化。分析了液晶空间光调制器的衍射效应,通过仿真分析像素结构、相位调制深度及周期内的相位级数对衍射效率的影响。

2 理论分析

2.1 液晶空间光调制器控制光束偏转

图 1 为反射式电寻址液晶空间光调制器的结构,向列液晶层被夹在两片表面镀有透明导电层的玻璃中间。上层导电层作为公共电极,下层导电层被分成彼此不导通的像素结构,进行寻址控制。导电层表面镀有定向层,使液晶分子顺着一定且平行于玻璃表面的方向排列。在液晶两端施加电场后,液晶分子的取向发生偏转,非寻常光折射率改变。当入射线偏振光沿平行液晶分子非寻常光轴方向入射时,液晶空间光调制器工作在纯相位调制状态,入射波面的相位分布调制。

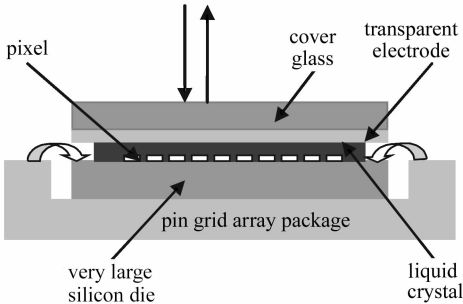


图 1 反射式电寻址液晶空间光调制器结构

Fig. 1 Cross sectional illustration of a LC-SLM

设平面波经过液晶空间光调制器反射后偏转,透射率函数为

$$t(x, y) = \left\{ \left[\sum_{m, n=0}^{N-1} \delta(x - mp, y - np) \right] \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \right\} \varphi(x, y), \quad (1)$$

式中 $\delta(\cdot)$ 为二维脉冲函数, m, n 分别为 x, y 方向上第 m 和第 n 个像素; p, d 均为相邻像素间隔及像素的有效尺寸,且 $d = p\rho, \rho$ 为像素填充因子; $N \times N$ 为液晶空间光调制器的像素数; $\varphi(x, y)$ 为倾斜像差的波函数

$$\varphi(x, y) = \exp[ik(f_{x0}x + f_{y0}y)], \quad (2)$$

式中 k 为波数, $k = 2\pi/\lambda, \lambda$ 为入射光波长, f_{x0}, f_{y0} 为倾斜像差系数。由于液晶像素结构特点,在单个像素区域内,相位调制量相同,(2)式变为

$$\varphi(x, y) = \exp[ik(f_{x0}mp + f_{y0}np)], \quad (3)$$

由傅里叶变换得到调制后的远场振幅分布

$$T(x', y') = \frac{d^2}{\lambda f} \left\{ \left[\sum_{m, n=0}^{N-1} \delta\left(x' - \frac{m}{p}, y' - \frac{n}{p}\right) \right] \otimes \text{sinc}(dx') \text{sinc}(dy') \right\} \otimes \mathcal{F}[\varphi(x, y)], \quad (4)$$

式中 \mathcal{F} 为傅里叶变换符号, f 为远场焦距, $f_x = \frac{x'}{\lambda f}$;

$f_y = \frac{y'}{\lambda f}, \text{sinc}(x) = \text{sinc}(\pi x)/\pi x$ 。从而光强分布为

$$I(x, y) = \left(\frac{d^2}{\lambda f}\right)^2 \text{sinc}^2[d(f_x - f_{x0})] \times \text{sinc}^2[d(f_y - f_{y0})] \frac{\sin^2[\pi(f_x - f_{x0})Np]}{\sin^2[\pi(f_x - f_{x0})p]} \times \frac{\sin^2[\pi(f_y - f_{y0})Np]}{\sin^2[\pi(f_y - f_{y0})p]}, \quad (5)$$

根据(5)式,经过液晶空间光调制器调制后,远场光斑位置平移了 (ff_{x0}, ff_{y0}) 距离,入射光束发生倾斜。

2.2 像素结构对衍射效率的影响

如(5)式所示,调制后远场分布是单矩孔衍射因子调制多光束干涉因子后形成的,中心衍射斑外的光能损失使液晶空间光调制器用于光束偏转的光能利用率降低。此时液晶的像素结构相当于两块黑白光栅的正交密接,光栅的零级衍射效率由填充比决定,图 2 中零级衍射效率随填充比增大而升高,填充比为 85% 时,衍射效率约为 75%。图 2 的计算结果未考虑液晶空间光调制器对入射光的相位调制,仅反映了相邻像素间的“死区”对光能利用率的影响。(3)式中像素结构使液晶空间光调制器的相位阶梯

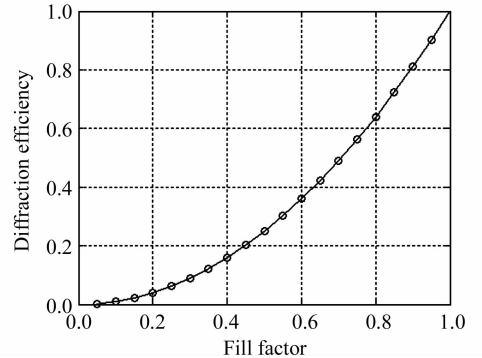


图 2 零级衍射效率随填充比变化的仿真结果
Fig. 2 Simulative relationship of zero diffraction efficiency and fill factor

分布,同一像素区域内仅能产生一个整体相移,不能满足相位的连续分布。当液晶空间光调制器对入射光进行相位调制时,即使填充因子为 1,衍射现象仍然存在,此时液晶空间光调制器有最大的零级衍射效率。为清楚起见,利用液晶空间光调制器调制入射波面得到离焦像差波面。图 3 为离焦的远场光斑的相位分布截面曲线,与理想相位分布曲线相比,即使填充系数为 1,相位的阶梯分布使入射光发生衍射,在零级衍射斑周围有其他衍射级次出现;当填充比等于 0.85 时,衍射效应增强,中心光斑强度进一步降低。

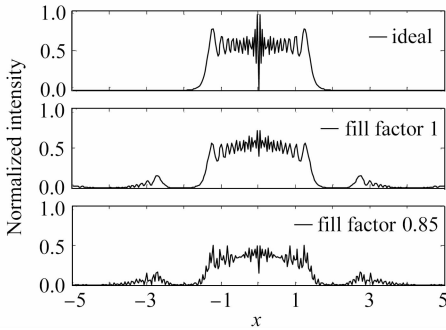


图 3 离焦的远场光斑的相位分布截面曲线

Fig. 3 Cross section curve of phase distribution of defocused far-field spot

2.3 相位调制深度的影响

假定器件的相位调制深度满足要求,液晶空间光调制器的相位分布函数 $\phi(x, y)$ 具有足够的调制动态范围。而对于实际液晶空间光调制器器件,通常采用减小液晶层厚的方法来提高响应速度,液晶空间光调制器的相位调制深度被限定在 $[0 \sim 2\pi]$ 。相位差超过 2π ,利用衍射光学中对相位函数的处理方法限制其在 $0 \sim 2\pi$ 的整数倍范围内,因此液晶空间光调制器的相位分布函数变为

$$\phi(x, y) = \{\varphi(x, y) - \text{round}[\varphi(x, y)/2\pi]\}, \quad (6)$$

式中 $\text{round}(\cdot)$ 为取整函数符号。(6)式的方法限制了相位范围,结果是相位分布函数以 2π 为步长不连续变化。相位差每变化一个 2π 整数倍出现一个相位的转折点,此方法被称为相位回卷(Phase Wrapping)方法。经过(6)式处理后,液晶空间光调制器可看成为一个周期可编程控制的闪耀光栅。根据衍射标量理论,相位连续变化的衍射光学元件理想的衍射效率为 100%。然而器件的像素结构特点使液晶空间光调制器以阶梯状相位轮廓逼近相位的连续分布。类阶梯状相位分布使器件衍射效率取决于光栅周期内所包含的相位级数 M 。对线性闪耀光栅,一级衍射效率为^[8]

$$\eta = \left[\frac{\sin(\pi/M)}{\pi/M} \right]^2, \quad (7)$$

由(7)式知,周期内包含的相位级数越多,衍射效率越高,对 $M = 8$ 的衍射光学元件,衍射效率几乎是 95%;当 $M = 2$ 时,二元光栅的衍射效率仅为 40.5%。利用液晶空间光调制器偏转入射光束,偏转角越大,光栅周期小包含的相位级数越少,衍射效率降低。需要注意的是,像素结构造成的衍射与相位调制时形成的闪耀光栅引起的衍射是完全不同的:当液晶空间光调制器相位调制时两种衍射效应同时存在,而关闭空间光调制器或给所有像素施加同一电压,只存在像素结构造成的衍射效应。液晶空间光调制器调制入射光束偏转时,当像素结构的零级衍射光全部集中到闪耀光栅的一级衍射谱中时,总衍射效率最大。图 4 为液晶空间光调制器的衍射效率随偏转角的变化关系,虚线仅表示 2π 调制深度形成的类闪耀光栅的衍射效率变化,实线为总衍射效率的仿真结果。由图 4 可知,液晶空间光调制器的衍射效率随着光束偏转角的增大而降低。对 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$, 像素尺寸 $18 \mu\text{m} \times 18 \mu\text{m}$ 的液晶空间光调制器,当相位级数等于 8 时,使入射光偏转 8.8 mrad,得到的最大衍射效率约为 70%。

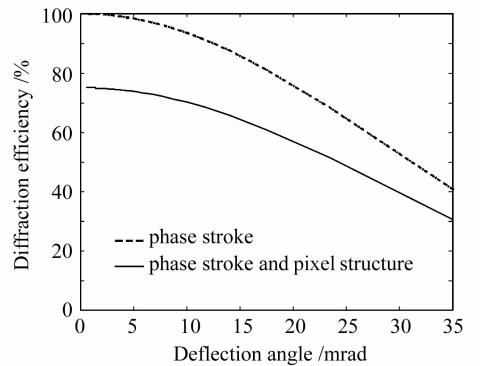


图 4 衍射效率与偏转角的仿真关系

Fig. 4 Relationship of diffraction efficiency and deflection angle

相位回卷方法使液晶空间光调制器的相位调制动态范围扩大,如果相位调制深度为 2π ,相位回卷能使相位分布函数以 2π 为步长准确变化。然而固定的液晶层厚度及液晶的色散特性,使液晶空间光调制器的 2π 调制深度只针对特定工作波长,对其他波长入射光,调制深度不再满足 $[0 \sim 2\pi]$,液晶空间光调制器产生的倾斜波面的拟合精度降低。图 5 为不同波长的入射光偏转时,液晶空间光调制器生成的倾斜波面和理想波面的均方根(RMS)误差。由图 5 可知,光束偏转角越大,误差越大;使不同波长

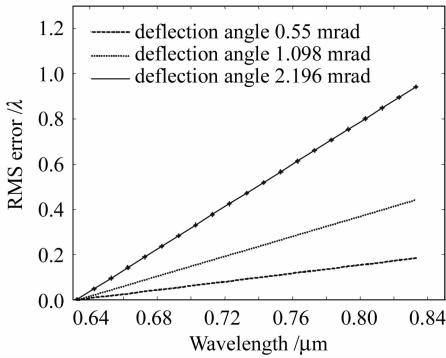


图 5 均方根误差与入射波长的关系

Fig. 5 Relationship of root-mean-square error and incident wavelength

的入射光偏转相同角度, 波长与液晶空间光调制器的工作波长偏离越大, 波面的拟合误差增大。根据文献[7]给出的衍射效率与波面拟合误差的关系, 液晶空间光调制器的衍射效率越低。

3 实验与讨论

3.1 液晶像素结构的零级衍射效率

实验装置如图 6 所示。调整入射光偏振方向, 使入射偏振方向平行于液晶寻常光轴方向。对所有像素施加相同控制电压, 光功率计记录透镜焦点位置零级衍射光强随控制电压的变化。改变入射偏振方向与液晶非寻常光轴方向平行, 同样记录零级衍射光强度随控制电压的改变。零级衍射测量强度变

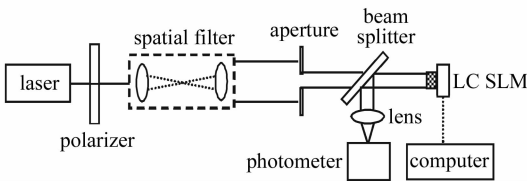


图 6 实验装置示意图

Fig. 6 Sketch of experimental setup

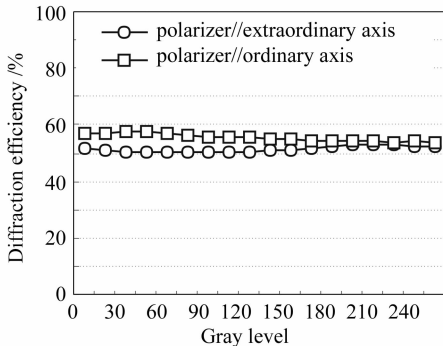


图 7 零级衍射效率实验结果

Fig. 7 Measured zero order diffraction efficiency

化曲线如图 7 所示。

当入射偏振方向沿寻常光轴方向入射时, 光线始终以寻常光折射率 n_o 传播, 液晶空间光调制器对入射光没有相位调制, 零级衍射效率不随控制电压变化而改变。入射偏振光沿非寻常光轴方向入射时, 光线将以非寻常光折射率 n_e 传播, 电压改变液晶分子逐渐趋向与液晶器件表面垂直, 入射偏振光将以 n_o 传播, 此时它将有最大的相位变化。实验中在所有像素施加相同的控制电压, 入射平面波经液晶空间光调制器调制后整体平移相位分布保持不变, 出射光的零级衍射效率不会发生改变, 图 7 中零级衍射效率基本不随电压的改变而变化。偏振方向平行非寻常光轴入射的平均衍射效率为 51.3%; 平行寻常光轴入射的平均衍射效率等于 56.3%, 衍射效率测量结果偏小反映了液晶基板反射损失及面型误差带来的散射损失。另外当灰度在 0~180 内, 相位调制时的衍射效率略低于不调制时的测量结果, 这可能是液晶分子扭曲不完全一致造成的。

3.2 液晶空间光调制器控制光束偏转的衍射效率

计算机控制液晶空间光调制器使入射平行光束偏转不同角度, 测量衍射效率随偏转角度的变化。图 6 所示的实验装置中调整入射光偏振方向, 使其实现纯相位调制, 光功率计记录光束偏转后远场分布的零级和一级光斑强度。

图 8 给出了衍射的零级和一级衍射效率随偏转角的变化, 测量结果未考虑像素结构造成的衍射。由图 8 可知, 一级衍射效率随光束偏转角增大而减小; 与仿真结果相比, 光束偏转角度越大, 光栅周期内相位级数减小, 阶梯状相位分布的衍射效应增强, 光能不能全部集中到闪耀光栅的一级谱线上, 零级和其他高阶衍射光斑出现; 零级衍射效率的变化幅度不大, 说明光能损失在除 0, 1 之外的其他高阶衍

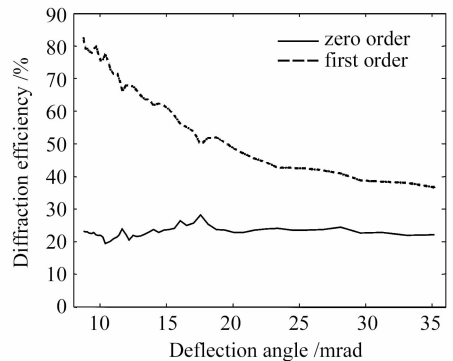


图 8 偏转角与衍射效率的实验关系

Fig. 8 Measured diffraction efficiency with different angles

射级次上。

图 9 为衍射效率随液晶空间光调制器的相位调制深度的变化。实验中光栅周期内的相位级数为 8,使不同波长的入射光均偏转 8.8 mrad。当液晶空间光调制器的相位调制深度偏离 2π 时,一级衍射效率减小,零级衍射效率增加;当相位调制幅度为 1.5π 时,衍射效率降低了大约 30%,光能损失在其他衍射级次上。

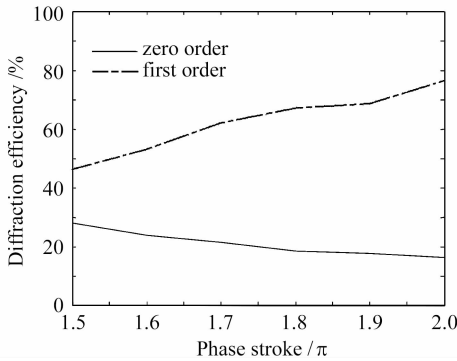


图 9 不同相位调制幅度的衍射效率变化
Fig. 9 Diffraction efficiencies with different phase strokes

4 结 论

利用液晶空间光调制器的相位调制特性实现入射光束的偏转控制。作为新型衍射光学元件,对液晶空间光调制器的衍射效率进行了理论分析和实验研究。对电寻址液晶空间光调制器,像素结构和有限相位调深幅度是造成衍射效应的主要原因。衍射效率随着像素填充比的增大而增大。相位回卷方法使器件的调制动态范围扩大,然而形成一个相位型

闪耀光栅结构。像素结构使光栅周期内的相位呈阶梯分布并使光栅的衍射效率减小。另外调制深度与波长有关的特点也是影响器件衍射效率的一个重要原因。

参 考 文 献

- Paul F. McManamon, Terry A. Dorschner, David L. Corkum *et al.*. Optical phased array technology [J]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(2):268~298
- 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
- Wang Ning, Li Guohua, Yun Maojin. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(12):1064~1066
王宁,李国华,云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12):1064~1066
- Liu Yongjun, Xuan Li, Hu Lifa *et al.*. Investigation on the liquid crystal spatial light modulator with high precision and pure phase [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12):1682~1686
刘永军,宣丽,胡立发等. 高精度纯相位液晶空间光调制器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12):1682~1686
- Yan Shuhua, Dai Yifan, Lü Haibao *et al.*. Manufacturing system for gray-scale masks based on the spatial light modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):45~47
颜树华,戴一帆,吕海宝等. 基于空间光调制器的灰度掩模制作系统[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1):45~47
- Li Ge, M. Duelli, R. W. Cohn. Enumeration of illumination and scanning modes from real-time spatial light modulators [J]. *Opt. Express*, 2000, **7**(12):403~416
- Emil Hällstig, Lars Sjöqvist, Mikael Lindgen. Intensity variations using a quantized spatial light modulator for non-mechanical beam steering [J]. *Opt. Eng.*, 2003, **42**(3):613~619
- H. P. Herzig. *Micro-optics Elements, System and Applications* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002
H. P. 赫尔齐克. *微光学元件、系统和应用* [M]. 北京:国防工业出版社, 2002