

Experimental Test for Polarized Splitting Light Characteristic of Twisted Nematic Liquid-Crystal Spatial Light Modulator

Binhu Wang, Yongxiang Xu, Fuzhong Bai*

School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Inner Mongolia
Email: *fzbaiim@163.com

Received: Feb. 28th, 2018; accepted: Mar. 12th, 2018; published: Mar. 19th, 2018

Abstract

When a linearly polarized light is incident to a twisted nematic liquid-crystal spatial light modulator (TN-LCSLM), the relationships of output intensity and rotating angles of two polarizers placed in front and behind of it are tested experimentally. Cooperated with theoretical analysis, it confirms the principle of polarized splitting light and composed intensity of TN-LCSLM with twisted angle of 90° under zero gray image unloaded. The studied conclusion can provide new idea for clearly understanding the TN-LCSLM'S modulation characteristic.

Keywords

Twisted Nematic Liquid-Crystal Spatial Light Modulator (TN-LCSLM), Crystal Birefringence, Polarized Splitting Light, Characteristic Test

扭曲向列型液晶空间光调制器偏振分光特性的实验测试

王斌虎, 徐永祥, 白福忠*

内蒙古工业大学机械学院, 内蒙古 呼和浩特
Email: *fzbaiim@163.com

收稿日期: 2018年2月28日; 录用日期: 2018年3月12日; 发布日期: 2018年3月19日

摘 要

实验测试了线偏振光入射至扭曲向列型液晶空间光调制器(TN-LCSLM)后, 输出光强与TN-LCSLM前后放

*通讯作者。

置的两个偏振片旋转角度间的关系。结合理论分析验证了扭曲角为 90° 的TN-LCSLM在零灰度图像驱动下的偏振分光特性与强度合成原理。研究结果为深入认识TN-LCSLM的调制特性提供新的研究思路。

关键词

扭曲向列型液晶空间光调制器(TN-LCSLM), 晶体双折射, 偏振分光, 特性测试

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

液晶空间光调制器(liquid-crystal spatial light modulator, 简称 LCSLM)能够将信息通过控制驱动信号加载于二维的光学场上,从而改变入射光波的相位、振幅、偏振等光学信息。LCSLM 具有空间分辨率高、响应速度快、可编程性、实时性强等优点,受到国内外学者和工程技术人员的青睐,在空间激光通信、多目标跟踪指向与制导、激光加工、光学信息处理、激光惯性核聚变、微光光学等领域有着重要的应用[1] [2]。

LCSLM 按照控制信号不同可分为光寻址和电寻址两类;根据其调制对象的不同可分为振幅型、相位型、复合型;按照光输出方式分为反射式和透射式两种;按照液晶内部分子排列可分为扭曲相列型(Twisted Nematic LCSLM, 简称 TN-LCSLM)和零扭曲相列型(Zero Twisted Nematic LCSLM, 简称 ZTN-LCSLM)。TN-LCSLM 也属于向列型液晶空间光调制器,不加电压时内部液晶分子从前表面到后表面呈递进扭曲,总扭曲角一般为 90° 。TN-LCSLM 具有旋光作用,可以对入射光束振幅、相位和偏振进行调制,是当代处理光学信息的重要器件。

针对 TN-LCSLM 的输出特性、时间特性以及空间特性的测试已有许多研究,例如针对相位调制深度、相位以及振幅调制特性的测试已经提出众多测试方法,包括马赫增德尔干涉法[3]、双缝干涉法[4]、共路干涉法等[5] [6] [7]。在上述针对 TN-LCSLM 特性测试实验或者是将其用于其它应用光学系统时,均需在 TN-LCSLM 的前后面分别增加一个偏振片,进而考虑第二偏振片后输出光的特性。而对于两个偏振片之间、尤其是入射光进入 TN-LCSLM 后以及由 TN-LCSLM 后表面出射后,这一阶段光束的变化情况以及相关理论分析很少有研究。事实上,有关 ZTN-LCSLM 在该研究方向的探讨却比较深入,例如将其作为共光路偏振分束装置[8] [9]或用来产生特定的偏振光[10] [11],进一步可将其应用于共光路干涉仪、光开关[12]等。

工程技术中,在共光路下实现光束的分离有着重要的用途,分束以后实现能量、波前相位、光束方向的可控性,对空间光调制器性能的提升有着很大的影响。基于这一特性,可以将这种 LCSLM 用于实现双折射透镜[13]、二元分光元件[14] [15]、共光路偏振移相器[16]、以及用于可调对比度干涉仪中,等等。

本文借助 ZTN-LCSLM 偏振分光的研究思路,以晶体双折射原理出发,重点利用实验的方法来讨论 TN-LCSLM 的偏振分光特性。TN-LCSLM 价格相对较低,响应速度较快,针对其偏振分光特性进行研究,可以进一步扩大其应用领域。同时,还可以帮助我们进一步深入认识 TN-LCSLM 的自身特性。

2. 理论分析

2.1. 液晶双折射原理

TN-LCSLM 液晶分子结构排列模型如图 1 所示。根据晶体的双折射效应[17] [18] [19],线偏振光束

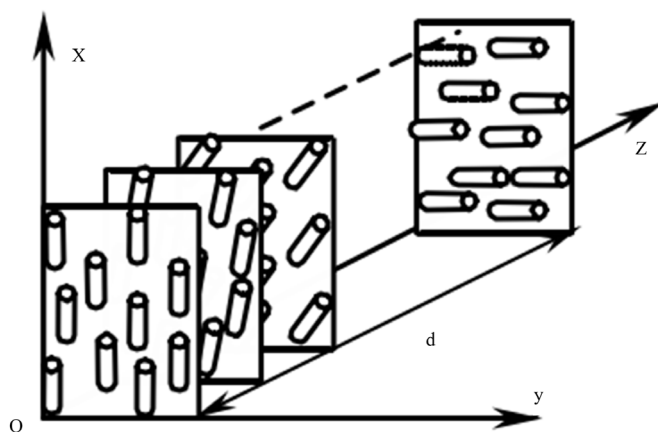


Figure 1. Molecular structure model of TN-LCSLM
图 1. TN-LCSLM 分子结构模型

沿 z 方向在液晶中传播时, 由于液晶分子在其长轴和短轴上对光束折射率不同(沿分子长轴的折射率为 n_e 、垂直于分子长轴的折射率为 n_o), 从而发生双折射现象。将分解成振动方向相互垂直、传播速度不等的线偏振光(即 o 光和 e 光)。 o 光为寻常光, 服从折射定律; e 光为非寻常光, 不服从折射定律。

TN-LCSLM 液晶分子的排列从前表面至后表面逐层递进发生扭曲, 每一层上所有液晶分子的扭曲角相等。当液晶前后表面不施加电场时, 液晶分子自然扭曲; 当所加电场超过阈值电压后, 液晶分子沿电场方向发生偏转。液晶片厚度为 d , 入射光波长为 λ , o 光和 e 光之间的相位差可表示为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d \quad (1)$$

当外加电场变化时, n_e 将随之变化, 从而产生不同的相位延迟 δ 。

图 2 所示液晶分子双折射示意图是根据液晶分子长轴和短轴所建立坐标系, 假设长轴与短轴分别沿 x 轴与 y 轴方向; P 为起偏器, 其偏振方向与液晶分子长轴方向呈 45° 。一束振动方向与液晶分子呈 45° 角的线偏振光束沿 z 轴方向垂直入射至液晶分子层时, 出射光将可分解为两束线偏振光, 由此产生双折射现象。两束光的振幅相等、振动方向垂直。振动方向与液晶分子长轴平行的称为 e 光, 相垂直的称为 o 光, 二者的复振幅分别用 E_x 和 E_y 表示。

2.2. 光学实验结构

用于测试 TN-LCSLM 偏振分光特性的光学结构示意图如图 3 所示。实验中被测对象为大恒公司 GCI-770102 型透射式液晶空间光调制器, 其扭曲角为 90° , 我们在前面的工作中已经进行了测试[20]。为了便于理论分析和说明, 我们将液晶前后表面分子长轴方向分别定义在 x 和 y 轴方向。在 TN-LCSLM 的前后两侧分别放置两个偏振片 P_1 和 P_2 , P_1 的偏振方向与 x 轴的夹角为 θ_1 ; P_2 的偏振方向与 y 轴的夹角为 θ_2 。定义: 迎着光的传播方向(z 轴)看, P_1 、 P_2 沿逆时针方向旋转时, θ_1 和 θ_2 为正。

偏振片 P_1 与 TN-LCSLM 前表面、以及偏振片 P_2 与后表面之间的几何矢量图如图 4 所示, 图中 E_e 和 E_o 分别表示 e 光与 o 光的复振幅分量。

2.3. 偏振分光与强度合成原理

根据图 4 所示几何矢量关系, 当偏振方向与 TN-LCSLM 前表面液晶分子长轴方向呈 θ_1 的一束线偏振光(振幅为 A)入射至液晶后, 在 x 和 y 轴上的复振幅分量为:

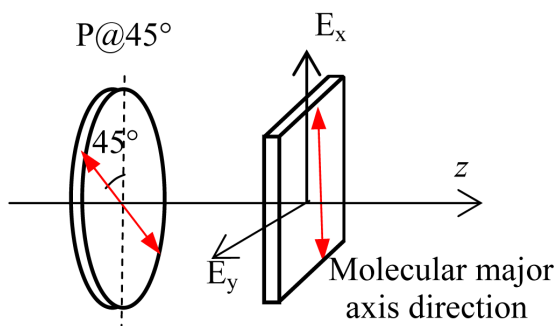


Figure 2. Liquid crystal molecular birefraction sketch
图 2. 液晶分子双折射示意图

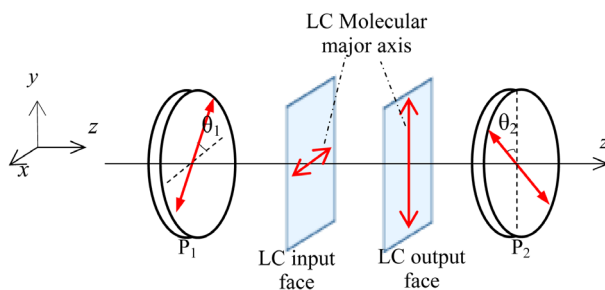


Figure 3. Optical configuration of experimental test
图 3. 实验测试光路简图

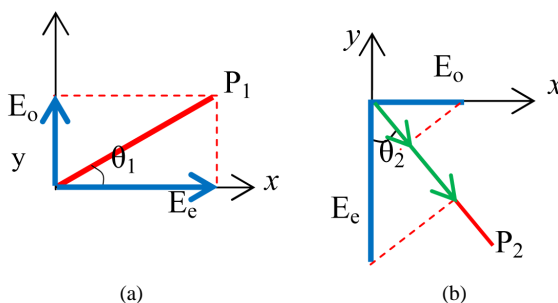


Figure 4. Geometric vector diagram between polarizer P_1 and input face of TN-LCSLM (a); polarizer P_2 and output face (b)
图 4. 偏振片 P_1 与 TN-LCSLM 前表面(a)、 P_2 与后表面(b)之间的几何矢量图

$$\begin{aligned} E_x &= A \cos \theta_1 \\ E_y &= A \sin \theta_1 \end{aligned} \tag{2}$$

与前表面液晶分子长轴相平行的分量为 e 光(E_x), 另一束相垂直的光为 o 光(E_y)。二者穿过液晶层时, 由于前后表面扭曲角的影响, 根据图 3 和图 4, 有如下假设:

e 光由 x 轴方向旋转至 y 轴方向(后表面液晶长轴方向), 并将引入相位调制 δ , 即

$$E'_y = A \cos \theta_1 e^{i\delta} \tag{3}$$

o 光由 y 轴方向旋转至 x 轴方向, 复振幅不发生变化, 即

$$E'_x = A \sin \theta_1 \tag{4}$$

二者再经过偏振片 P_2 后, 分解到 P_2 偏振方向的分量分别为

$$\begin{aligned} E_y'' &= A \cos \theta_1 \cos \theta_2 e^{i\delta} \\ E_x'' &= A \sin \theta_1 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (5)$$

合成光强为:

$$I = |E_x'' + E_y''|^2 = A^2 \cos^2(\theta_1 - \theta_2) - A^2 \sin 2\theta_1 \sin 2\theta_2 \sin^2(\delta/2) \quad (6)$$

实验中为液晶加载零灰度图像从而产生零相位差, 即 $\delta = 0$ 。

如果 $\theta_1 = 45^\circ$, 即偏振片 P_1 的偏振方向与 TN-LCSLM 前表面液晶分子长轴方向夹角为 $\pi/4$, 式(6)可以写成:

$$I = A^2 \cos^2\left(\frac{\pi}{4} - \theta_2\right) \quad (7)$$

上式表示当偏振片 P_1 处于 $\theta_1 = 45^\circ$ 位置时, 出射光强与偏振片 P_2 旋转角度之间的关系。

如果 $\theta_2 = 0^\circ$ 或 90° , 即偏振片 P_2 与后表面液晶分子长轴方向之间的夹角等于 0 或 $\pi/2$, 式(6)可以写成:

$$I = A^2 \cos^2 \theta_1, \quad \theta_2 = 0^\circ \quad (8)$$

$$I = A^2 \cos^2\left(\theta_1 - \frac{\pi}{2}\right), \quad \theta_2 = 90^\circ \quad (9)$$

上式表示当偏振片 P_2 处于 0° 和 90° 位置时, 出射光强与偏振片 P_1 旋转角度之间的关系。

假设入射光的振幅 $A = 1$, 根据公式(7)至(9), 仿真得到出射光强 I 与角度 θ_2 ($\theta_1 = 45^\circ$)、与角度 θ_1 ($\theta_2 = 0^\circ$ 或 90°) 之间的关系曲线, 分别如图 5(a)、图 5(b)所示。

3. 实验及结果分析

实验中使用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光作为入射光, 经扩束准直形成 $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ 的方形孔径平行光束, 入射至图 3 所示实验系统; 使用 8 位 CCD 相机记录光强信息。

根据文献[20]提出的方法测量出该 TN-LCSLM(大恒公司 GCI-770102 型)的扭曲角为 90° ; 同时得到 TN-LCSLM 前后两个表面液晶分子长轴方向, 将它们的位置分别作为偏振片 P_1 和 P_2 的零度位置。

然后为 TN-LCSLM 加载零灰度图像, 分别旋转 P_1 和 P_2 完成以下两个实验, 由此验证实验结果与理论分析的相符程度。

3.1. 偏振片 P_2 旋转角度对出射光强的影响

将偏振片 P_1 旋转至 $\theta_1 = 45^\circ$ 的位置, 然后旋转 P_2 、使 θ_2 从 0° 至 210° 、以 10° 为步长进行变化; 共记录 22 帧光强图像, 经过平均处理后作为光强数据。图 6 显示了出射强度与 θ_2 之间的关系曲线。

对比图 6 实验结果与图 5(a)仿真结果可以发现, 两曲线非常相近, 而且实验测试曲线接近余弦变化规律; 当 θ_2 等于 45° 时, 出射光强达到最小值; 当 θ_2 等于 135° 时, 出射光强达到最大值; 而在 0° 、 90° 、 180° 位置时, 出射光强近似等于最大光强的一半。

由此说明, 当 $\theta_1 = 45^\circ$ 时, LCSLM 将入射线偏振光分解为两束振幅相等的正交线偏振光; 进一步当 $\theta_2 = 45^\circ$ 和 135° 时, o 光和 e 光分别发生干涉相消和干涉相长, 从而使出射光强达到最小和最大值。

3.2. 偏振片 P_1 旋转角度对出射光强的影响

将偏振片 P_2 旋转至 $\theta_2 = 0^\circ$ 的位置, 相当于出射光中仅包含 e 光分量。然后旋转 P_1 、使 θ_1 从 -40° 至

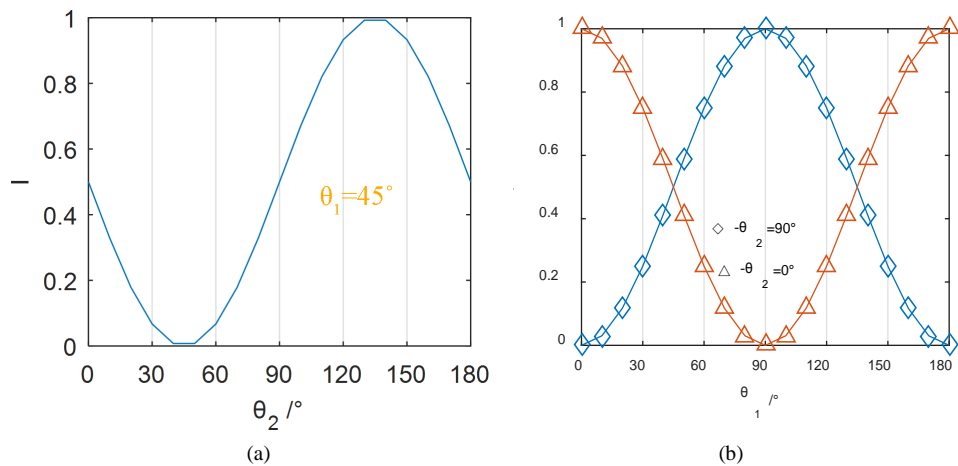


Figure 5. Simulated curves of the relation between the exiting intensity and θ_2 and θ_1 respectively
图 5. 出射光强与 θ_2 和 θ_1 之间的仿真关系曲线

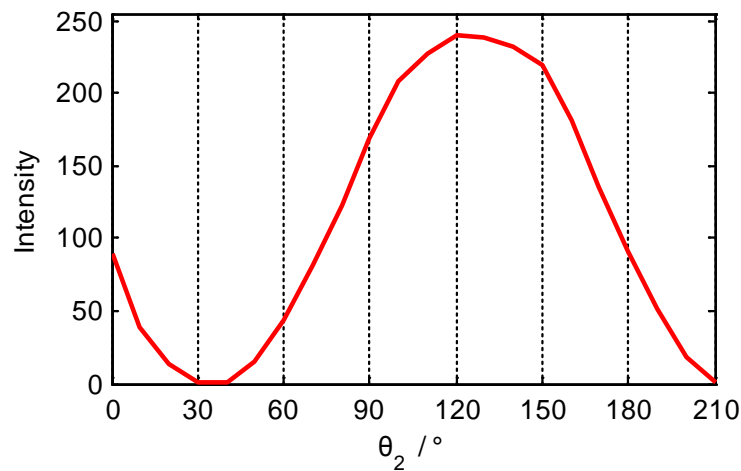


Figure 6. Experimental result of exiting intensity vs. θ_2 under $\theta_1 = 45^\circ$
图 6. $\theta_1 = 45^\circ$ 时出射光强与 θ_2 之间的实验测试结果

140°、以 10°为步长进行变化；共记录 18 个光强数据。另外，将偏振片 P_2 旋转至 $\theta_2 = 90^\circ$ 的位置，相当于出射光中仅包含 o 光分量，重复上述实验过程。两次测试得到的实验结果如图 7 所示。

对比图 7 实验结果与图 5(b) 仿真结果可以发现：

1) 实验结果近似符合余弦曲线规律，并且变化趋势与仿真结果相近。

2) 当 $\theta_2 = 0^\circ$ 时，偏振片 P_2 的振动方向与 e 光振动方向平行，因此出射光中仅包含 e 光分量。此时出射强度的变化是由于旋转 P_1 引起入射光在液晶分子长轴方向上的分量的变化而造成。当 θ_1 接近 0° 时，入射线偏振光的振动方向与液晶分子长轴方向平行，进入液晶的 e 光分量达到最大值，因此出射光强也达到最大值。

同理，当 $\theta_2 = 90^\circ$ 时，出射光中仅包含 o 光分量，此时强度变化是由于旋转 P_1 引起入射光在垂直液晶分子长轴方向上的分量的变化而造成。

3) 当 P_1 处于 $\theta_1 = -45^\circ$ 、 45° 和 135° 这几个位置时，o 光和 e 光的强度相等；这说明，此时线偏振光入射至液晶后产生两个振幅相等的偏振分量。进一步地，上述角度之间相差 90° 、包括图 7 中两条曲线相

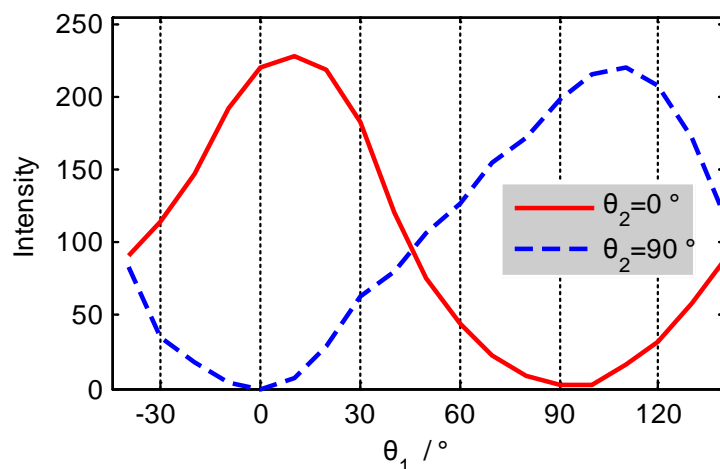


Figure 7. Experimental result of exiting intensity vs. θ_1
图 7. 出射光强与 θ_1 之间的实验测试结果

差半个周期(90°), 说明两个偏振分量的振动方向相差 $\pi/2$ 、即为正交偏振。

4. 结论

论文首先从理论角度分析了 TN-LCSLM 的分光特性与出射光强的变化规律。然后通过两个实验测试了出射光强与前后两个偏振旋转角度之间的关系, 实验测试结果与理论分析吻合较好。由此说明了 TN-LCSLM 具有与 ZTN-LCSLM 器件类似的偏振分光特性。如果入射至液晶的线偏振光的振动方向与 TN-LCSLM 前表面液晶分子长轴方向既不平行也不垂直时, 即 θ_1 不等于 0° 或 90° 时, 将产生两个分别与液晶分子长轴方向平行和垂直的近似线偏振的偏振分量; 如果 θ_1 等于 45° 时, 这两个偏振分量拥有相等的振幅。论文的研究结果可以对 TN-LCSLM 的深入认识、特性测试以及工程应用提供新的思路与指导。本文讨论的内容是在为 TN-LCSLM 加载零灰度图像情况下完成, 进一步关于 TN-LCSLM 的调制特性与驱动灰度间的关系在后面的工作进行研究。

基金项目

国家自然科学基金(51765054), 内蒙古自治区自然科学基金(2016MS0620)。

参考文献

- [1] 徐展斌, 应朝福, 林培秋, 等. 纯相位液晶空间光调制器相位调制特性的优化[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2009, 32(2): 164-168.
- [2] 蔡冬梅, 薛丽霞, 凌宁, 等. 液晶空间光调制器相位调制特性研究[J]. 光电工程, 2007, 34(11): 19-23.
- [3] Lu, K.H. and Saleh, B.E.A. (1990) Theory and Design of the Liquid Crystal TV as an Optical Spatial Phase Modulator. *Optical Engineering*, **29**, 240-245. <https://doi.org/10.1117/12.55584>
- [4] Cox, I.J. and Mille, M. (1997) A Review of Watermarking and Importance of Perceptual Modelling Human Vision and Imaging. *Proceedings of SPIE*, **20**, 181-184.
- [5] 马靖, 裴丽燕, 许灿华, 周雄图. 用偏光干涉法动态测量扭曲向列型液晶指向矢[J]. 光子学报, 2016, 45(12): 1226001.
- [6] 李大海, 潭泽富, 陈怀新, 等. 采用环路径向剪切干涉法测量液晶电视的相位调制特性[J]. 光子学报, 2002, 31(8): 970-974.
- [7] 苗悦, 白福忠, 刘珍, 田朝平, 梅秀庄. 采用共光路干涉法测量液晶空间光调制器的相位调制特性[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(2): 129-134.

- [8] Moreno, I., Davis, J.A., Klein, F.A., *et al.* (2008) Polarization-Splitting Common-Path Interferometer Based on a Zero Twist Liquid Crystal Display. *Applied Optics*, **47**, 1797-1801. <https://doi.org/10.1364/AO.47.001797>
- [9] Sarkadi, T. and Kop, P. (2011) Measurement of the Jones Matrix of Liquid Crystal Displays Using a Common Path Interferometer. *Journal of Optics*, **12**, Article ID: 035404.
- [10] Davis, J.A., Pascoguin, B.M.L., Moreno, I. and Nava-Veg, A. (2009) Circular-Polarization-Splitting Common-Path Interferometer Based on a Zero-Twist Liquid-Crystal Display. *Optics Letters*, **34**, 1486-1488. <https://doi.org/10.1364/OL.34.001486>
- [11] 刘伯晗, 吴丽莹, 张健. 一种用于衍射光元件优化设计的快速算法的研究[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 219-224.
- [12] Li, B.-X., Borshch, V., Shiyanovskii, S.V., Liu, S.-B. and Lavrentovich, O.D. (2014) Electro-Optics Switching of Dielectrically Negative Nematic through Nanosecond Electric Modification of Order Parameter. *Applied Physics Letters*, **104**, 201105. <https://doi.org/10.1063/1.4879018>
- [13] 余湛. 基于液晶空间光调制器光束整形的理论算法和实验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [14] Leger, J.R., *et al.* (1998) Coherent Laser Beam Addition: An Application of Binary Optics Technology. *Lincoln Laboratory Journal*, **1**, 255-246.
- [15] Liang, J.Y., Kohn, R.N., Becker, M.F., *et al.* (2009) 1.5% Root-Mean-Square Flat-Intensity Laser Beam Formed Using a Binary-Amplitude Spatial Light Modulator. *Applied Optics*, **48**, 1955-1968. <https://doi.org/10.1364/AO.48.001955>
- [16] Bai, F.Z., Miao, Y., Xu, Y.X., Wang, G. and An, P. (2017) Absolute Measurement of the Generated Aberrations from Liquid Crystal Spatial Light Modulator Using a Common-Path Interferometry. *Journal of Modern Optics*, **64**, 1257-1262. <https://doi.org/10.1080/09500340.2016.1277563>
- [17] Henderson, C.J., Robertson, B., Leyva, D.G., *et al.* (2005) Control of A Free-Space Adaptive Optical Interconnect Using a Liquid-Crystal Spatial Light Modulator for Beam Steering. *Optical Engineering*, **44**, 075401-075408. <https://doi.org/10.1117/1.1948108>
- [18] Tholl, H.D. (2006) Novel Laser Beam Steering Techniques. *Proceedings of SPIE*, **6397**, 639708. <https://doi.org/10.1117/12.689900>
- [19] 龚华平, 吕志伟, 林殿阳. 激光束空间整形的研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2005, 42(9): 2-5.
- [20] 苗悦. 液晶空间光调制器相位特性测量[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2016.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-6980, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: iae@hanspub.org