

相位型光寻址空间光调制器稳定性分析

裴丽丽^{1,2}, 黄大杰^{1*}, 范薇^{1,2}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 基于光寻址空间光调制器的等效电路仿真及稳定性测试实验,对纯相位型光寻址空间光调制器的稳定性进行分析和优化。结果表明,光阀液晶层的电压脉冲波形会引起光寻址空间光调制器对读出光的相位调制波动,而驱动电压频率与写入光强度同时影响相位调制波动幅度及相位调制量。由实验测量得到的光寻址空间光调制器的相位改变量曲线可知:当驱动电压周期比响应时间小 95% 时,最大相位改变量对应的相位波动率减小为 0.35%,但此时相位调制能力仅为 0.8λ ;通过优化光寻址空间光调制器驱动条件参数,可获得 1λ 的相位调制能力,同时最大相位改变量对应的相位波动率为 1%。

关键词 空间光调制器; 电压波形; 垂直偏振; 相位波动

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0801002

Stability Analysis for Optically-Addressed Phase-Only Spatial Light Modulator

Pei Lili^{1,2}, Huang Dajie^{1*}, Fan Wei^{1,2}

¹National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The working stability of an optically-addressed phase-only spatial light modulator is analyzed and optimized based on the equivalent circuit simulation of the optically-addressed spatial light modulator and an experiment to measure its stability. The results demonstrate that the voltage waveform on the liquid crystal layer of the light valve causes the phase fluctuation of the readout light modulated by the optically-addressed spatial light modulator and that the driving voltage frequency and write light intensity simultaneously affect the modulator's phase fluctuation amplitude and phase change capability. Based on the aforementioned analysis and by testing the phase change curves of the optically-addressed spatial light modulator, it is found that when the driving voltage period is 95% less than the response time, the phase fluctuation rate corresponding to the maximum phase change of the phase modulation curve is reduced to 0.35%; however, the phase modulation capability is only 0.8λ . By optimizing the driving condition parameters of the optically-addressed spatial light modulator, a phase modulation capability of 1λ is obtained, and the phase fluctuation rate corresponding to the maximum phase change of the phase modulation curve is 1%.

Key words optical devices; spatial light modulator; voltage waveform; vertical polarization; phase fluctuation

OCIS codes 230.6120; 230.4110; 230.3720; 350.5030

1 引言

液晶空间光调制器(LC-SLM)作为主动型器件,是光束整形领域不可或缺的部分。通过电场操

纵液晶光阀内部的各向异性介质实现对入射光束相位、强度、偏振的精确调制。在寻址模式下,空间光调制器的每个像素单元可单独受到电信号或光信号的控制,液晶层加载空间变化的电场,实现对读出光

收稿日期: 2019-03-07; 修回日期: 2019-03-08; 录用日期: 2019-04-08

* E-mail: hdajie@siom.ac.cn

复振幅信息的调制。电寻址空间光调制器通过寻址电极对每个独立的像素施加电压,改变液晶的光学性质。由于电场能够直接控制直接控制液晶(LC)分子,因而具有功耗低的优势,但像素电极的工艺导致其具有较低的开口率、分辨率以及较高的成本^[1]。对于光寻址空间光调制器(OASLM),液晶光阀被施加驱动电压,由光电导层接收空间强度变化的写入光,从而改变液晶层的电场分布^[2]。相比之下,OASLM不需要像素电极,从而降低了器件的制作难度,避免了电极衍射效应,具有更高的填充因子。纯相位型空间光调制器(PASLM)通常被用于波前调制系统^[3]、飞秒脉冲整形^[4]、光纤通信^[5-6]、变焦透镜^[7]、可调谐光栅^[8]等领域,且具有成本低、紧凑性高等优势。在这些应用中,要求SLM具有较大的相位调制能力。

近年来,国内针对SLM的研制及性能优化开展了相关工作,其中,中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室(以下简称“上海光机所联合实验室”)自主研发的振幅型光寻址空间光调制器已经成功应用在大型激光装置“神光”系列装置中^[9]。该课题组进一步开展了一系列纯相位型空间光调制器的研究工作,主要采用理论模拟与实验相结合的方式研究了纯相位型空间光调制器调制能力的主要影响因素。此外,该课题组还通过瞬态静态测试,得到了调制器的相位改变量响应曲线及在线相位调制系统的空间分辨率,最终获得了大于 1λ 的在线相位调制能力^[10]。

光寻址空间光调制器由外加交流电压驱动,其液晶层分压波形受驱动电压频率和写入光强度的影响。Guralnik等^[11]通过液晶的复介电常数求解外电场作用下液晶的等效电容和电导解析式。Ide等^[12]在基于电寻址空间光调制器的光学衰减器的研究中,将电压频率设置在输出光信号无“波形响应”的刷新频率之上,以得到稳定的调制结果。在光寻址空间光调制器的实时波前调制实验中发现,受低频电压驱动的光寻址空间光调制器调制后的输出光为随时间变化的信号,影响相位调制系统的精度,单纯提高电压频率会降低调制器的调制能力,如何同时达到高稳定性和大的调制能力仍然是一个难点。因此,有必要进一步针对光寻址空间光调制器的稳定性进行分析研究。目前,国内外关于相位型光寻址空间光调制器性能的研究主要集中在光电导材料及液晶材料方面,以提高其调制能力、分辨率、

响应速度为主要目的^[13-15],关于光寻址空间光调制器外部驱动条件对其调制稳定性影响方面的研究还鲜有报道。

鉴于此,本文通过光寻址空间光调制器的等效电路仿真分析及相位调制稳定性实验测量,研究光寻址空间光调制器相位调制稳定性与液晶层实际电压波形的关系,以及相位调制波动率与电压频率、写入光驱动电流的关系。基于此,优化调制器的外部驱动条件,使光寻址空间光调制器的相位调制稳定性受电压波形的影响降为最低,最终实现在相位调制波动率最小的情况下,同时达到最大的相位调制能力。

2 基本原理

2.1 相位型 OASLM 的结构、工作原理及电压特性

图1为自主设计的相位型OASLM的基本工作原理:由电流源驱动LED输出波长为470 nm的写入光,准直后经过反射式电寻址光调制器(WXGA Active Matrix LCD, LCOS, Holoeye Co., 德国),通过计算机向LCOS输入灰度图以调制写入光的强度分布,最后照射液晶光阀,以实现1053 nm偏振读出光的相位调制。OASLM的核心部分——光寻址液晶光阀(OALCLV)的主要结构为:厚度 $l = 1\text{ mm}$,有效感光面积 $S = 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的BSO光电导层;平行取向,厚度 $d = 6\text{ }\mu\text{m}$ 的向列型液晶层(HTD028200-200, HCCH Co., 中国),其非寻常折射率 $n_e = 1.820$,寻常折射率 $n_o = 1.515$;厚度为1 mm的玻璃基底。通过外部驱动电路向液晶光阀加载交流驱动电压,由写入光强度控制液晶层电压,实现对读出光的相位调制。

对于向列型液晶,当存在外电场作用时,将总电流密度沿液晶盒厚度积分可以得到液晶层复介电常数^[11],即

$$Z^{-1} = \frac{I}{V} = G - i\omega C = \frac{-i\omega C_0}{\langle \boldsymbol{\epsilon}^{-1} \rangle}, \quad (1)$$

式中: I 为电流; V 为外电场电压; ω 为角频率; $C_0 = \epsilon_0 S/d$ 为液晶盒的几何电容。介电张量 $\boldsymbol{\epsilon}$ 可由其垂直和平行于电场方向的分量 ϵ_{\perp} 、 ϵ_{\parallel} 及液晶分子的指向矢方向 θ 表示为

$$\boldsymbol{\epsilon} = \epsilon_{\perp} \cos^2 \theta + \epsilon_{\parallel} \sin^2 \theta. \quad (2)$$

(1)式中实部 G 和虚部 C 分别定义为液晶的等效电导和电容。当外加电压超过液晶分子的阈值电压时,二者分别由介电常数的实部 ϵ' 与虚部 ϵ'' 表示为

OALCLV: optically addressed LC light valve
 ITO: indium tin oxide conductive film
 LCOS: liquid crystal on silicon
 PBS: polarized beam splitter
 BSO: $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$
 PI: polyimide

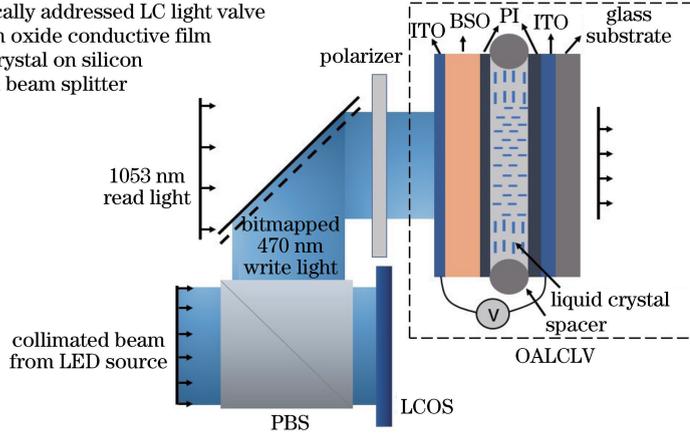


图 1 OASLM 的工作原理及液晶光阀的结构,通过 470 nm 写入光对 1053 nm 读出光进行调制

Fig. 1 Principle of OASLM and structure of OALCLV. 1053-nm read light is modulated by 470-nm write light

$$\begin{cases} G = \omega C_0 \epsilon''_{\parallel} \\ C = C_0 \epsilon'_{\parallel} \end{cases} \quad (3)$$

基于以上液晶的电容电导特性,在分析外部驱动条件对 OASLM 响应特性的影响时,液晶光阀可以等效为如图 2 所示的电路模型^[16]。其中, R_{LC} 与 C_{LC} 分别为液晶层的电阻与电容, R_0 是 BSO 的暗电阻, R_{ϕ} 是 BSO 在均匀写入光照射下的电阻(随写入光强度而改变), R_1 和 C_1 分别为 BSO 晶体的捕获效应电阻与电容,上述参数的值由液晶的电学特性及 BSO 的电脉冲响应关系直接计算得到。从图 2 可以看出,当外部驱动电压为 V_{AC} 时,其液晶层分压 V_{LC} 为

$$V_{LC} = V_{AC} \times \frac{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_{\phi}} + j\omega C_{BSO} + \frac{j\omega C_1}{1 + j\omega R_1 C_1}}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_{\phi}} + j\omega C_{BSO} + \frac{j\omega C_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{1}{R_{LC}} + j\omega C_{LC}} \quad (4)$$

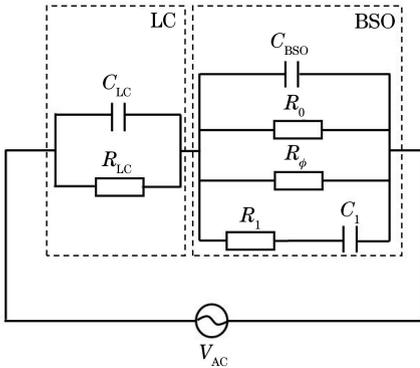


图 2 光寻址液晶光阀的等效工作电路,包括液晶和 BSO 晶体两部分

Fig. 2 Equivalent circuit of OALCLV, including liquid crystal and BSO crystal

本课题组的前期工作^[10]详细给出了液晶盒的电压响应曲线及液晶层电压方均根(RMS)的实验测量方法。通过求解(4)式得到在不同写入光强度下,液晶层分压 RMS 值随驱动电压频率的变化关系如图 3 所示,可以看出,点值实验测量的结果与理论值分布一致,证明等效电路中所设置参数的可靠性。其中,调制器工作条件为:液晶光阀的方波驱动电压值 $V_{RMS} = 14$ V;在 4 种 LED 驱动电流值下, LCOS 加载灰度值为 0~0.8 的图像时,对应的 4 种写入光强度范围分别为 $0.13 \sim 3.25 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、

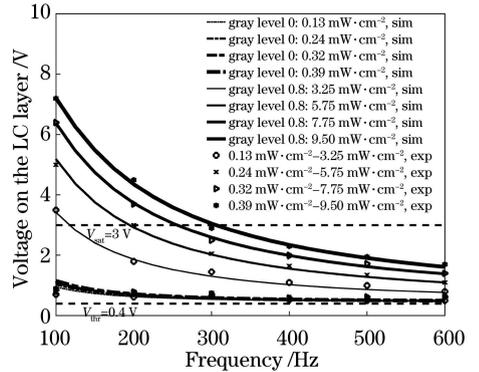


图 3 不同写入光光强下,液晶层电压 RMS 值随电压频率的变化关系。实线为 0.8 灰度值对应的液晶层电压模拟计算值,虚线为 0 灰度值对应的液晶层电压模拟计算结果,点值为相应的实验测量结果

Fig. 3 RMS voltage on LC layer as functions of voltage frequency at different write light intensity values. Solid curves are simulated voltage values on liquid crystal layer corresponding to 0.8 gray level, and dashed curves are simulated voltage values on liquid crystal layer corresponding to 0 gray level, and dots are corresponding experimental results

0.24~5.75 mW·cm⁻²、0.32~7.75 mW·cm⁻² 及 0.39~9.50 mW·cm⁻²。由图 3 可知:液晶的阈值工作电压为 0.4 V,饱和电压为 3 V;0~0.8 灰度区间对应的 V_{LC}的 RMS 值范围随液晶层电压频率的增加而减小,导致 OASLM 调制能力降低;提高写入光的强度变化范围,可使 V_{LC}的 RMS 值具有更大的动态范围,OASLM 具有更强的调制能力。以上结论可作为提高 OASLM 性能的重要依据。

2.2 OASLM 相位调制稳定性测试实验原理

图 4 所示为 OASLM 相位调制稳定性测量系统基本原理。将 OASLM 置于与透光轴方向互相垂直的起偏器、检偏器之间,且其光轴与起偏器透光轴方向成 45°,构成垂直偏振测量系统。非偏振激

光垂直射入系统,经过调制后出射光场的 Stokes 矢量 S_{out} 为

$$S_{out} = M_P(90^\circ)M_R(\delta, 45^\circ)M_P(0^\circ)S_{in}, \quad (5)$$

式中: $M_P(\theta)$ 表示透光轴沿 θ 的偏振器件的 Mueller 矩阵; $M_R(\delta, \varphi)$ 为光轴方向沿 φ 分布且具有相位改变量 δ 的相位型器件的 Mueller 矩阵。

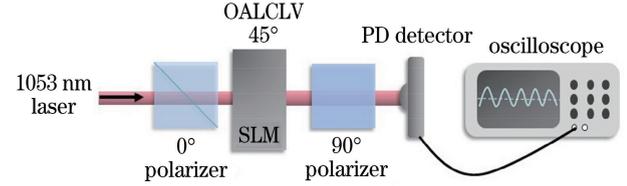


图 4 垂直偏振测量实验原理

Fig. 4 Principle of vertical polarization measurement

$$M_P(\theta) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) & 0 \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & 0 \\ \sin(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$M_R(\delta, \varphi) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\varphi) + \cos \delta \sin^2(2\varphi) & (1 - \cos \delta) \sin(2\varphi) \cos(2\varphi) & -\sin \delta \sin(2\varphi) \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin(2\varphi) \cos(2\varphi) & \sin^2 2\varphi + \cos \delta \cos^2(2\varphi) & \sin \delta \cos(2\varphi) \\ 0 & \sin \delta \sin(2\varphi) & -\sin \delta \cos(2\varphi) & \cos \delta \end{pmatrix}. \quad (7)$$

OASLM 相位调制稳定性测量系统的输出光场受偏振器件的偏振方向、相位型器件光轴方向及相位延迟量的共同作用。线偏振光受到光轴与起偏器方向成 45°角的液晶光阀的调制,根据双折射原理,线偏光沿光轴方向的分量受相位延迟的影响,其偏振方向发生变化,则由检偏器出射的输出光强度与相位型器件的延迟量成函数关系。检偏器出射的光束被光电二极管接收且由示波器实时显示光强 I 的值。探测器检测到的光强为出射光波 Stokes 矢量的首项 S_{out0} ,将(6)式和(7)式代入(5)式,得到光电探测器检测光强^[17]为

$$I = S_{out0} = A(1 - \cos \delta) = \frac{I_{max}}{2}(1 - \cos \delta), \quad (8)$$

式中: A 为由实验装置决定的常数,当 $\cos \delta = -1$ 时,探测器检测到最大光强度 I_{max} ,则 $A = I_{max}/2$ 。故 OASLM 在给定驱动条件下对光束的相位调制量为^[18]

$$\delta = 2 \times \arcsin \left(\sqrt{\frac{I}{I_{max}}} \right). \quad (9)$$

3 OASLM 相位调制稳定性分析与测试

由 2.1 节的分析可知,液晶的电容电阻特性使实际液晶层的电压不再是理想的方波。在液晶光阀正常工作的条件下,无法直接测量液晶层的实际电压波形;当写入光强度变化时,由(4)式求解液晶层的实际电压分布的难度较大,且耗时较长。本课题组的前期研究已经证明 OASLM 的等效电路用于研究其液晶层电压分布的可靠性^[10],因此,可以借助 Multisim 软件来研究光阀液晶层的实际电压波形分布。

设置 OASLM 的写入光光强为 3.25 mW/cm²,根据写入光强与 BSO 光照电阻的关系^[16],计算得到此时的光照电阻 $R_\varphi = 6.42 \times 10^5 \Omega$ 。表 1 给出了 OASLM 在此工作条件下计算得到的等效电路参数。

图 5(a)所示为液晶光阀液晶层电压的仿真结果,其中:粗实线表示外部驱动电压为峰值 $V_p = 20$ V、频率 $f = 100$ Hz 时的方波交流电压;细实线表示仿真得到的液晶层实际电压 V_{LC} 波形不再是理

表 1 Multisim 软件仿真得到的液晶光阀的等效电路参数
Table 1 Parameters for Multisim software simulating OASLM

Parameter	Value	Parameter	Value
Capacitance of the LC layer C_{LC}/F	5.9×10^{-9}	Dark BSO resistance R_0/Ω	1.25×10^{12}
Resistance of the LC layer R_{LC}/Ω	1.5×10^6	Trapping effect capacitance C_1/F	1.2×10^{-10}
Capacitance of the BSO C_{BSO}/F	1.98×10^{-10}	Trapping effect resistance R_1/Ω	6×10^6

想情况下的方波电压,其值在时间上具有上升与下降的变化过程,且在单个极性内具有最大值 $V_{max} = 1.88 \text{ V}$,最小值 $V_{min} = 1.27 \text{ V}$ 。由 2.1 节的分析可知,这是由液晶光阀的电容电阻特性导致的。取 V_{LC} 最大值与最小值的平均值作为液晶层理想方波电压的幅值 $V_p = 1.57 \text{ V}$,所得波形如图 5(a)的虚线所示。

当液晶的响应时间与驱动电压周期在同一数量级时,液晶光阀对外加电压不再是“方均根响应”,而是随电压脉冲波形变化的“帧响应”,即当低频外场对液晶分子的作用力远大于液晶分子间的相互作用力时,液晶分子指向矢遵循外场的瞬时值重新排

列^[19],则液晶层电压的波动变化使得受 OASLM 调制的出射光相位值随时间出现波动变化。

根据图 5(a)仿真得到的液晶层的实际电压分布,结合 $d = 6 \mu\text{m}$ 液晶盒相位改变量与电压之间的响应关系^[10],拟合得到 OASLM 在低频驱动电压下入射光束的相位调制结果,如图 5(b)所示,其中实线为仿真得到的液晶层实际电压对应的相位改变量随时间变化的波形,虚线为理想方波电压对应的相位改变量随时间的变化,在当前条件下具有单一值 1.03λ 。此时,OASLM 对入射光的调制结果围绕其理想方波调制结果波动分布,其波动频率 $f = 200 \text{ Hz}$,是驱动电压频率的 2 倍。

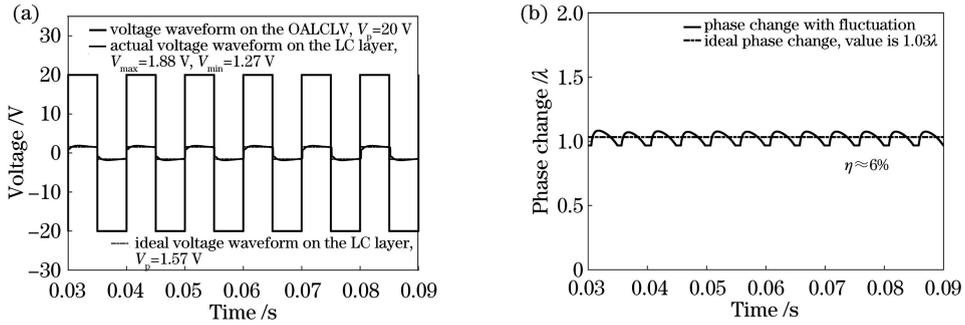


图 5 100 Hz 驱动电压频率下电压波形及相位波动。(a)液晶光阀驱动电压波形及液晶层分压波形仿真结果;
(b)驱动电压波形对应的相位调制波动仿真结果,具有 200 Hz 频率及 6% 的相位波动率

Fig. 5 Voltage waveform and phase fluctuation with 100 Hz driving voltage frequency. (a) Simulated shapes of voltage on OALCLV and LC layer; (b) phase modulation fluctuation with frequency of 200 Hz and fluctuation rate of 6%

基于 2.2 节的相位调制测量原理搭建了如图 6 所示的实验装置,设置 OASLM 加载与上述模拟过程相同的驱动条件,即具有峰值 $V_p = 20 \text{ V}$ 的方波电压,同时将写入光的光强设置为 $3.25 \text{ mW}/\text{cm}^2$,

得到如图 7 所示的输出光强度分布。可以看出,当电压频率 $f = 100 \text{ Hz}$ 时,调制结果不再是理想的单一定值,而是具有频率 $f = 200 \text{ Hz}$ 且随时间变化的波动分布结果,波动频率与仿真拟合分析的结果一

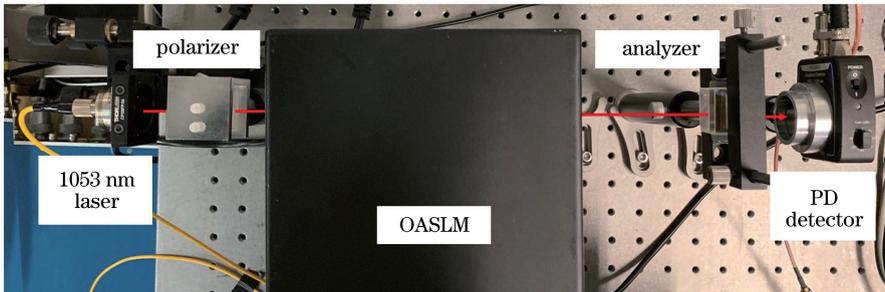


图 6 OASLM 相位调制实验装置
Fig. 6 Setup for OASLM phase modulation experiment

致,说明调制结果的波动确实是由液晶层电压波形引起的,且与驱动电压的频率对应。在上述实验结果中,波动相位的最大值 P_{Max} 与最小值 P_{Min} 的平均值被定义为相位正常值 P_{Nor} ,则相位波动率 η 为

$$\eta = \frac{P_{\text{Max}} - P_{\text{Nor}}}{P_{\text{Nor}}} \times 100\% \quad (10)$$

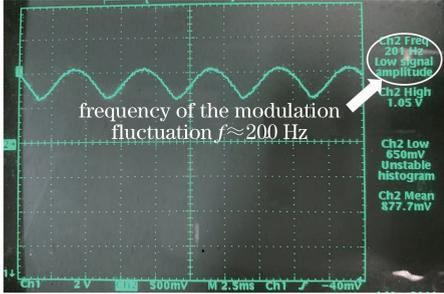


图 7 示波器实测的 100 Hz 驱动电压频率下 OASLM 对入射光的调制结果,波动频率为 200 Hz

Fig. 7 200-Hz modulation fluctuation corresponds to OASLM at 100-Hz driving voltage frequency measured by oscilloscope

由以上分析可知,液晶光阀“帧响应”不利于 OASLM 的光束整形应用,而调制波动与驱动电压的频率直接相关,因此需要进一步研究二者的关系。将 OASLM 驱动电压频率从 10 Hz 增加到 100 Hz,分别仿真得到如图 8 实线所示的相位波动率结果。同时,通过对实验系统进行设置,使 OASLM 工作在与仿真过程相同的驱动条件下,利用(9)式将示波器探测的强度结果转换为相位值,得到最终的相位波动结果。本实验分别测试了驱动电压频率从 10 Hz 增加到 100 Hz 的相位波动率,得到图 8 所示的点值结果。

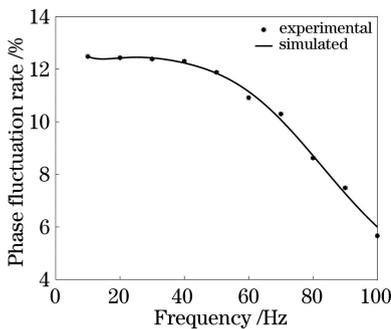


图 8 相位调制波动率随驱动电压频率的变化

Fig. 8 Phase modulation fluctuation rate as a function of voltage frequency

从图 8 可以看到,实验结果与仿真结果的分布一致。特别地,当驱动电压频率 $f = 100$ Hz 时,实测相位波动率 $\eta \approx 6\%$,图 5(b)所示的仿真结果显示 OASLM 在当前驱动条件下的波动幅度约 0.1λ ,对

应 6% 的相位波动率,仿真结果与实测结果相同,表明等效电路仿真具有可靠性。相位波动率曲线呈现随电压频率增加而下降的变化趋势,因此在其他条件不变时,提高 OASLM 电压的频率,可减小相位调制结果的波动幅度,提高器件的稳定性。但是由 2.1 节的分析可知,当驱动电压频率增加时,0~0.8 灰度区间的液晶层分压范围缩小,导致 OASLM 的相位调制能力减弱。因此,在改进器件相位调制稳定性的同时,必须兼顾器件的相位调制能力。

4 OASLM 相位调制稳定性优化及调制能力提升

根据 OASLM 的特定相位改变量-灰度关系曲线,设计 LCOS 加载的灰度图,进行光束的相位调制,精确的相位改变量曲线是波前调制结果达到设计要求的依据。因此,需要通过实验测试分析具有波动分布的相位改变量曲线及其对应的相位波动率结果,以进一步优化 OASLM。

4.1 OASLM 的响应时间

OASLM 的响应时间是当外场条件改变时,液晶分子由一种稳定态过渡到另一种稳定态时的渡越时间,它是由液晶材料的固有性质决定的。由文献[15]可知,液晶相位型器件的响应时间为

$$\tau = \frac{\gamma_1}{K_{33}} \frac{d^2}{\pi^2} \quad (11)$$

式中: γ_1 为液晶的黏度; K_{33} 为液晶的弯曲弹性常数; d 为液晶盒的厚度。在所使用的液晶中, $\gamma_1 = 0.246 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, $K_{33} = 17 \times 10^{-12} \text{ N}$,对应光阀的响应时间 $\tau = 53 \text{ ms}$ 。

在图 6 所示的实验装置中,将灰度图的灰度值由 0.22 增加到 0.26,其他条件不变时,LCOS 加载的灰度值发生变化,即写入光强度发生变化,从而引起光阀液晶层电压改变,表现为被调制光强度的改变,其渡越时间为光阀响应时间。由图 9(a)示波器显示的输出光强度变化结果可知,读出光强度由 1.38 V 降低到 0.06 V,对应的调制器响应时间 $\tau \approx 50 \text{ ms}$,与上述计算值基本一致。同时,图 9(b)给出了切换灰度图时写入光强度的变化波形,可以看出 LCOS 的强度变化时间相对于图 9(a)所示的输出光强度变化时间很小,因此对 OASLM 响应时间的测量影响可以忽略。

4.2 OASLM 的相位调制稳定性优化

在图 6 所示的实验光路中,将 OASLM 的驱动电压频率从 100 Hz 增加到 400 Hz,每隔 100 Hz 分

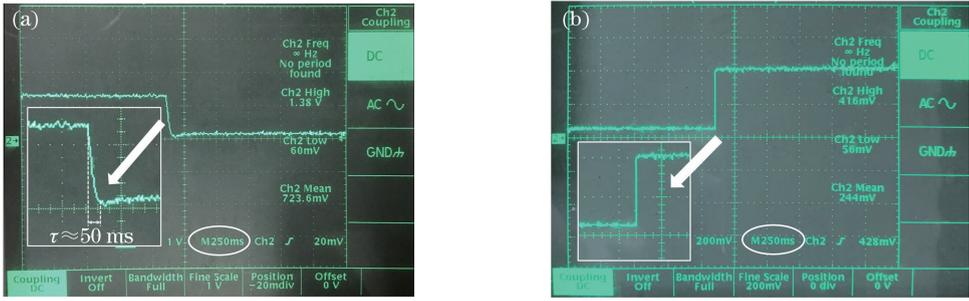


图 9 OASLM 响应时间的测量结果。(a)输出光波形;(b)写入光波形

Fig. 9 Measurement result of OASLM response time. (a) Waveform of output light; (b) waveform of write light

别测试 OASLM 的相位改变量曲线。在特定频率下使 LCOS 加载的灰度值由 0 增加到 0.8 (写入光光强范围选为 $0.13 \sim 3.25 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$), 每隔 0.02 灰度值, 分别测量被调制光束的强度分布, 并且由示波器显示, 由(9)式计算得到与强度最大值、最小值分别对应的相位值, 二者的平均值作为正常相位值。以此方法得到在 $0 \sim 0.8$ 灰度范围内带有相位波动的相位改变量曲线如图 10(a) 所示, 其中实线为灰度值对应的 OASLM 相位延迟量 P_{Nor} , 虚线表示对应的 P_{Max} 和 P_{Min} , 二者相对于平均值的偏差为相位波动幅度。

分析图 10(a) 可得, 驱动电压频率从 100 Hz 增加到 400 Hz, OASLM 的正常值相位改变量曲线的峰谷(PV)值由 1λ 减为 0.8λ , 由图 3 所示的液晶层电压分布结果可知, 这是由液晶光阀在 $0 \sim 0.8$ 灰度范围内液晶层分压范围减小导致的。对比 4 条相位改变量曲线可知, 同一灰度值对应的相位波动幅度随着驱动电压频率的增大而明显减小, 特别地, 0.8 灰度值对应的相位波动幅度由 100 Hz 时的 0.0634λ 减小到 400 Hz 时的 0.0027λ , 故增大驱动电压的频率, 虽然会减弱调制器的相位调制能力, 但可以降低相位波动幅度, 得到更精确的相位改变量曲线。

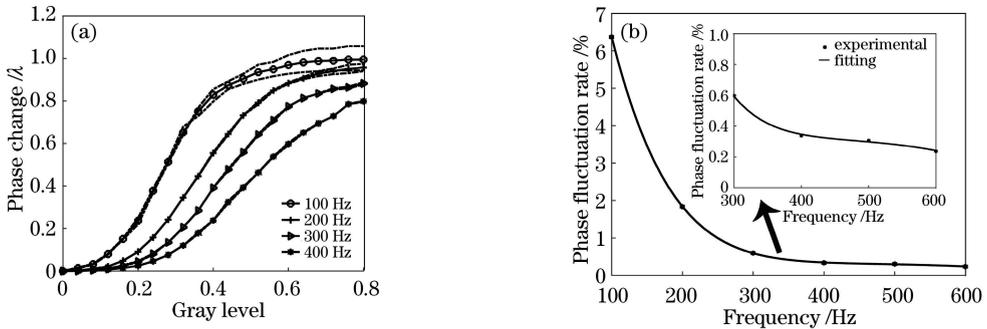


图 10 OASLM 的相位改变量曲线与相位波动率。(a) 100~400 Hz 电压频率下, 相位改变量曲线的实验测量结果, 实线为相位改变量正常值, 虚线为波动幅度; (b) 最大相位改变量处, 相位波动率随电压频率的变化, 插图为 300~600 Hz 相位波动率的分布细节

Fig. 10 Phase change curves and phase fluctuation rate of OASLM. (a) Phase change curves when voltage frequency increases from 100 Hz to 400 Hz. Solid curves are normal values of phase change, and dashed curves are fluctuation range; (b) phase fluctuation rate as a function of voltage frequency at maximum phase change. The inset is phase fluctuation rate details from voltage frequency of 300 Hz to 600 Hz

进一步测量得到驱动电压频率从 100 Hz 增加到 600 Hz, 最大相位改变量处, 即 0.8 灰度值对应的相位调制波动率, 结果如图 10(b) 所示。可以看到, 随着驱动频率的增加, 相位波动率从 6% 逐渐减小, 在 400 Hz 时降低到 0.35%, 且 400 Hz 后的相位波动率基本保持稳定。分析图 10(a) 中 400 Hz 频率对应的相位改变量曲线, 此时实线与虚线基本重合, 0.8 灰度值对应的相位波动幅值也仅为 0.0027λ , 满

足相位调制的精度要求, 故定义 400 Hz 为调制器在写入光强度范围为 $0.13 \sim 3.25 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时的相位调制波动“截止频率”。当电压频率高于此值时, OASLM 在 $0 \sim 0.8$ 灰度值范围内工作时, 电压波形引起的相位波动可以忽略。由 4.1 节可知, OASLM 的响应时间 $\tau \approx 50 \text{ ms}$, 400 Hz 对应的电压周期比 OASLM 响应时间小 95%。

图 11 所示为在不同驱动电压频率下, 由示波

器实时测量的 0.8 灰度值对应的系统的输出光强度分布,可以看出,当 $f=100$ Hz 时,被 OASLM 调制后的光束具有比较大的波动,随着驱动频率

的增加,输出光的调制波动幅度逐渐减小,在 400 Hz 以上时,调制结果基本保持稳定,波动幅度可以忽略。

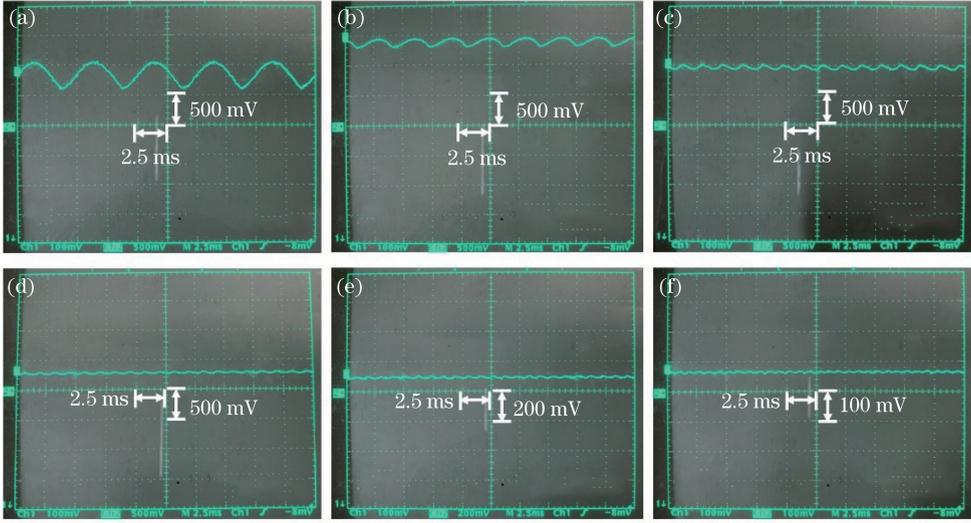


图 11 不同驱动频率下示波器测量的调制结果。(a) $f=100$ Hz; (b) $f=200$ Hz; (c) $f=300$ Hz; (d) $f=400$ Hz; (e) $f=500$ Hz; (f) $f=600$ Hz

Fig. 11 Modulation results measured by oscilloscope corresponding to different voltage frequencies. (a) $f=100$ Hz; (b) $f=200$ Hz; (c) $f=300$ Hz; (d) $f=400$ Hz; (e) $f=500$ Hz; (f) $f=600$ Hz

4.3 优化 OASLM 写入光强度范围以提升调制能力

由图 10(a) 的结果可知,同一驱动电压频率下相位调制曲线的波动幅度随灰度值的增加而逐渐增大,这是因为灰度值与写入光强度正相关。由图 3 的光阀液晶层分压结果可知,在驱动电压频率不变的条件下,当写入光光强增加时,对应液晶层电压 V_{LC} 的有效值增大,液晶层实际分压峰值提高,导致调制结果出现更大的波动幅度。由 4.1 节的分析可知,在 $0.13 \sim 3.25$ mW/cm^2 写入光强度范围内,当驱动电压频率高于 400 Hz 时,OASLM 的相位波动幅度已经在测量要求的范围内,但相位调制能力仅为 0.8λ 。由图 12 所示功率计测量得到的不同写入光驱动电流下,灰度值与写入光光照强度的关系可知,对于 OASLM,增加 LED 驱动电流,LCOS 加载 $0 \sim 0.8$ 灰度区间对应更大的写入光光照强度范围,相应液晶层分压范围增大,能够使调制器相位改变量曲线具有更高的 PV 值,即提高写入光驱动电流能够增加 OASLM 的相位调制能力。因此需要进一步分析写入光强度范围变化时相位改变量曲线的分布情况。

在图 6 所示的实验装置中,将 OASLM 驱动电压频率设置为 400 Hz,设置 LED 的驱动电流,使 $0 \sim 0.8$ 灰度值对应的写入光光强变化范围如图 12 所示,即 $0.13 \sim 3.25$ $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $0.24 \sim$

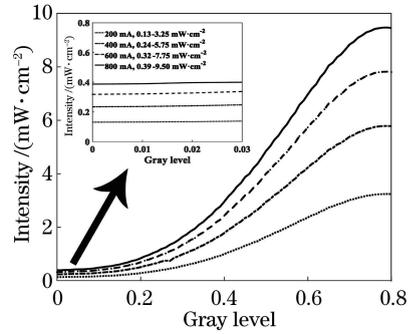


图 12 4 种写入光强度范围下,写入光强度与灰度值的对应关系,插图为 $0 \sim 0.03$ 灰度值对应的光强值细节

Fig. 12 Correspondence between write light intensity and gray level under four kinds of write light intensity range. The inset is detailed intensity values corresponding to gray level values of $0 \sim 0.03$

5.75 $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $0.32 \sim 7.75$ $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、 $0.39 \sim 9.50$ $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$,在上述条件下分别测量相位改变量曲线,结果如图 13(a) 所示,虚线表示存在相位波动时对应的相位最大与最小值,实线为其正常相位改变量曲线。分析实验结果可得,在写入光强度范围增大的过程中,OASLM 正常相位调制曲线的 PV 值由 0.8λ 增加到 1λ ,同时在 4 种驱动电流下得到的相位调制曲线中,虚线与对应的实线基本重合,即相位调制波动明显减弱。

为了进一步量化相位波动幅度,测量了写入光

光照强度范围增加的过程中,最大相位改变量处,即 0.8 灰度值处对应的相位波动率如图 13(b)所示。可以看到, OASLM 驱动电压频率设置为 400 Hz 时,随着写入光光照强度范围增加,由 V_{LC} 峰值增加导致的相位波动率仍然会增加,但此时相位响应曲线的最大相位波动幅值对应的相位波动率小于

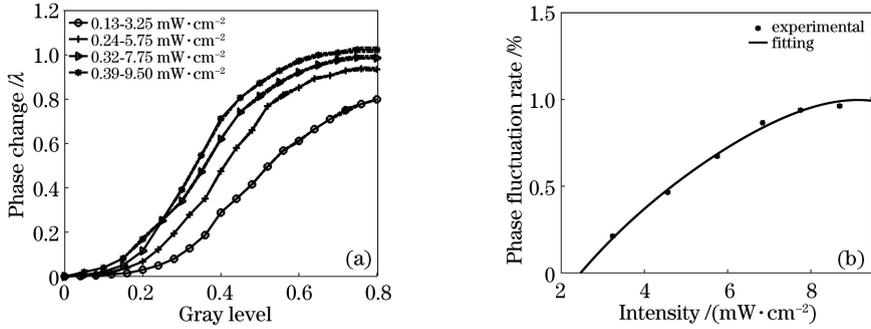


图 13 400 Hz 驱动电压频率下, OASLM 的相位调制响应曲线与相位波动率。(a) 4 种写入光强度范围对应的相位调制响应曲线, 实线为相位改变量的正常值, 虚线为波动幅度; (b) 最大相位改变量处相位波动率随写入光强度的变化

Fig. 13 Phase modulation curves and phase fluctuation rate when OASLM is at 400-Hz driving voltage frequency. (a) Phase change curves when OASLM is at four kinds of write light intensity range. Solid curves are normal values of phase change, and dashed curves are fluctuation range; (b) phase fluctuation rate as a function of write light intensity at maximum phase change

在相位改变量曲线的实验测量中,可由读出光的强度分布计算得到相应的相位延迟量。由(9)式可知,读出光强度与相位成正弦关系,在强度变化的拐点,强度曲线的斜率为 0,导致计算的相位波动幅度减小,但单个点值误差对分析整条相位响应曲线及相位波动幅度变化规律的影响较小,故本文的实验方法对于相位型 OASLM 器件稳定性的评价依然可靠。

5 结 论

对自主研制的 1053 nm 波段纯相位型 OASLM,由等效电路仿真及实验测量得到:在较低的驱动电压频率下,液晶对电压波形分布的跟随运动导致读出光的调制相位出现波动;当电压周期比 OASLM 的响应时间小 95% 以上时,能够避免电压波形对调制器稳定性的影响。最终, OASLM 在电压频率为 400 Hz、写入光强度变化范围设置为 0.39~9.50 mW·cm⁻² 时,可获得最小的相位波动,并具有 1λ 的相位调制能力。调制器的相位调制波动研究结果将为下一步 OASLM 的光束相位补偿及任意波前生成应用提供参考,有利于在 OASLM 设计中更加合理地设置驱动条件,最终避免电压波形导致的调制不稳定,进一步提高其调制能力及精度。

1%,结合图 13(a)所示的相位调制曲线可以得到,写入光光强范围 0.39~9.50 mW·cm⁻² 对应 OASLM 的相位调制能力为 1λ,此时最大相位调制波动幅度仅为 0.0103λ,对应的相位波动率为 1%,故此时的调制器在具有最大调制能力的同时具有很小的相位波动。

参 考 文 献

- [1] Huignard J P. Spatial light modulators and their applications[J]. Journal of Optics, 1987, 18(4): 181-186.
- [2] Sala F A, Karpierz M A. Modeling of molecular reorientation and beam propagation in chiral and non-chiral nematic liquid crystals[J]. Optics Express, 2012, 20(13): 13923-13938.
- [3] Peña A, Andersen M F. Complete polarization and phase control with a single spatial light modulator for the generation of complex light fields[J]. Laser Physics, 2018, 28(7): 076201.
- [4] Rao S L, Wu P C, Zhang C C, et al. Energy-controllable femtosecond laser fabrication based on spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0102008.
饶生龙, 吴培超, 张晨初, 等. 基于空间光调制器的能量可控飞秒激光加工[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0102008.
- [5] Ruskuc A, Koehler P, Weber M A, et al. Excitation of higher-order modes in optofluidic photonic crystal fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(23): 30245-30254.
- [6] Peng B, Zhong K, Li Z Y. Influence of topological charge on turbid underwater propagation of Laguerre-Gaussian vortex beams[J]. Acta Optica Sinica,

- 2017, 37(6): 0601005.
- 彭波, 钟昆, 李中云. 拓扑荷数对拉盖尔-高斯涡旋光浑浊水下传输的影响[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0601005.
- [7] Han J, Liu J, Liu D M, *et al.* Optimizing approach of wavefront aberration in the recording of holographic lens based on spatial light modulator[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209023. 韩剑, 刘娟, 刘冬梅, 等. 基于空间光调制器的全息透镜记录波前像差优化方法[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209023.
- [8] McManamon P F, Dorschner T A, Corkum D L, *et al.* Optical phased array technology[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(2): 268-298.
- [9] Huang D J, Fan W, Cheng H, *et al.* Applications of OALCLV in the high power laser systems [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10457: 104571P.
- [10] Pei L L, Huang D J, Fan W, *et al.* Phase-only optically addressable spatial-light modulator and on-line phase-modulation detection system[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1812.
- [11] Guralnik I R, Belopukhov V N, Love G D, *et al.* Interdependence of the electrical and optical properties of liquid crystals for phase modulation applications[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(9): 4069-4074.
- [12] Ide M, Suguro A, Hosaka Y, *et al.* A pixelized variable optical attenuator using liquid crystal on silicon technology for tunable filters [J]. Optical Review, 2004, 11(2): 132-139.
- [13] Kirzhner M G, Klebanov M, Lyubin V, *et al.* Liquid crystal high-resolution optically addressed spatial light modulator using a nanodimensional chalcogenide photosensor[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2048-2051.
- [14] Shrestha P K, Chun Y T, Chu D P. A high-resolution optically addressed spatial light modulator based on ZnO nanoparticles [J]. Light: Science & Applications, 2015, 4(3): e259.
- [15] Hu L F, Peng Z H, Wang Q D, *et al.* Calculation of electro-optical characteristics of phase-only liquid crystal modulator [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2017, 32(3): 182-189. 胡立发, 彭增辉, 王启东, 等. 纯相位液晶调制器的响应特性计算[J]. 液晶与显示, 2017, 32(3): 182-189.
- [16] Aubourg P, Huignard J P, Hareng M, *et al.* Liquid crystal light valve using bulk monocrystalline Bi₁₂SiO₂₀ as the photoconductive material [J]. Applied Optics, 1982, 21(20): 3706-3712.
- [17] López-Téllez J M, Bruce N C, Delgado-Aguillón J, *et al.* Experimental method to characterize the retardance function of optical variable retarders[J]. American Journal of Physics, 2015, 83(2): 143-149.
- [18] Lee Y H, Franklin D, Gou F W, *et al.* Two-photon polymerization enabled multi-layer liquid crystal phase modulator [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 16260.
- [19] de Jeu W H. Physical properties of liquid crystalline materials[M]. Boca Raton: CRC press, 1980.