

文章编号 1004-924X(2007)04-0460-07

铁电液晶基空间光调制器的灰度响应特性

王梦遥, 潘 炜, 罗 斌, 邹喜华, 张伟利

(西南交通大学 信息科学与技术学院 光通信与光器件研究所, 四川 成都 610031)

摘要:提出了一类以铁电液晶作光调制层的空间光调制器等效电路模型,对调制器的灰度响应特性进行了动态仿真研究,给出了驱动电压频率 100 Hz~1 kHz 和写入光强 0~10 mW/cm² 时调制器的强度转移特性曲线。结果表明,光寻址空间光调制器(OASLM)电光响应的上升时间随写入光强的增加而减少,写入光强由 0.5 mW/cm² 增加到 10 mW/cm², 上升时间从 1.44 ms 减少为 74 μs。写入光强存在使输出光强随之(准)线性增加的范围,调制器工作在该范围内即可显示不同灰度;强度转移特性对电压频率十分敏感,调节频率可对调制器的工作范围及灰度区内强度转移特性曲线的斜率等进行控制,频率由 100 Hz 增加到 1 kHz,工作范围由(0.08 mW/cm², 1 mW/cm²)改变为(2 mW/cm², 10 mW/cm²),同时线性段内强度转移特性曲线的斜率减小。另外,虽然擦除光对强度转移特性的影响很弱,但必须注入擦除光以抑制无写入光注入时的光响应和保证在新信息写入前擦除先前的信息。由该模型得到的仿真实验结果在趋势与量级上均与有关文献的实测结果相一致。

关键词:铁电液晶;光寻址空间光调制器;电路模型;灰度响应;强度转移特性

中图分类号:O753.2;TN761.92 **文献标识码:**A

Gray-scale response of spatial light modulator incorporating ferroelectric liquid crystals

WANG Meng-yao, PAN Wei, LUO Bin, ZOU Xi-hua, ZHANG Wei-li

(*Institute of Optical Communications, School of Information Science & Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

Abstract: An equivalent circuit model of Optically Addressed Spatial Light Modulator (OASLM) incorporating Ferroelectric Liquid Crystal (FLC) is proposed. The model is used in studying gray-scale response of the OASLM and intensity transfer characteristics while drive voltage frequency varying from 100~1 kHz and write-light intensity varying from 0~10 mW/cm². The results indicate that the rise time of electro-optical responses decreases from 1.44 ms to 74 μs as write-light intensity increases from 0.5 mW/cm² to 10 mW/cm². It also indicates that write-light intensity has a range over which gray-scales are best produced since output-light intensity increases linearly or nearly linearly with write-light intensity in this region. The intensity transfer characteristic is highly dependent on drive voltage frequency which can be set to adjust the region producing gray-scales, the slope of intensity transfer characteristic in the region producing gray-scales, and so forth. When write-light intensity in-

收稿日期:2006-07-03;**修订日期:**2006-9-19.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 10174057;No. 90201011);教育部科学技术研究重点项目(No. 105148);四川省应用基础研究项目(No. 03JY029-048-1);西南交通大学科学研究基金资助项目(No. 2001B11)

creases from 0.5 mW/cm^2 to 10 mW/cm^2 , the gray-scale range (0.08 mW/cm^2 , 1 mW/cm^2) is changed to (2 mW/cm^2 , 10 mW/cm^2), and the slope of intensity transfer characteristic in the region is decreased. Furthermore, although intensity transfer characteristic is weakly dependent on erase-light intensity, the erase-light is necessary to restrain the unexpected optical response when write-light is not injected and ensure a proper erasure of the device. The simulation results from the model have shown good agreement with the reported experimental results in both magnitude and tendency.

Key words: Ferroelectric Liquid Crystal (FLC); Optically Addressed Spatial Light Modulator (OASLM); circuit model; gray scale response; intensity transfer characteristic

1 引言

光寻址空间光调制器(Optically Addressed Spatial Light Modulator: OASLM)是全光通信网中的重要器件,它应用于光模式识别、图像/波长转换以及光神经网络等技术领域,是目前人们研究的热点之一^[1-6]。以铁电液晶(Ferroelectric Liquid Crystal: FLC)作光调制层的 FLC-OASLM 不仅具备普通液晶空间光调制器质量小,功耗低,无机机械惰性等特点^[7],而且由于 FLC 具有很快的光电响应速度(微秒量级)^[8],因此在光信息处理系统中具有良好的发展潜力^[9-11]。

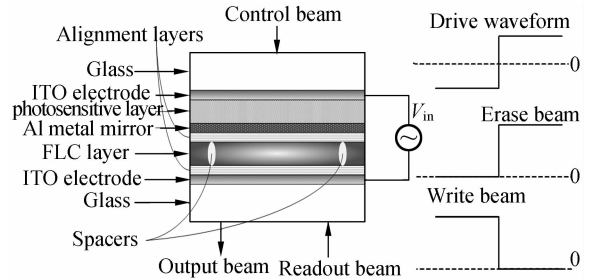
建立关于 FLC-OASLM 的模型有助于对其性能进行分析、预测和优化。电路模型适合描述 OASLM 的内部结构(光敏层结构介于光导体和光电二极管之间)和外部环境(受电信号驱动,所在的光电集成系统中多包含电阻、电容及硅基元件等电学器件),被广泛应用在对 OASLM 工作机制的分析中^[12-14]。它的优越性还表现在能够充分利用 EDA(电子电路设计自动化)这一现代电子工程领域的新兴技术,方便于将器件模型向光电集成系统扩展以及对驱动波形、器件参数等进行优化和设计。事实上,电路模型已成功应用于包括半导体激光器在内的许多光电器件的研究^[15, 16],但是,由于缺乏恰当的电学模型表征光调制层,目前应用在 OASLM 上的电路模型只能得到调制层上的电压分布,而对输出光响应特性的研究则必须通过复杂的数值计算来实现^[13, 14]。

为了将电路模型拓展到对 FLC-OASLM 光响应特性的研究中,本文在前期工作开发 FLC 显示器 PSpice 可视化模型的基础上^[17, 18],以器件的实测参数为模拟参数,就图 1 所示的 FLC-OASLM 建立等效电路模型,解决了用电路模型

无法直接对光响应进行模拟分析的实际困难。针对 FLC-OASLM 的瞬态响应和灰度调制特性实施动态研究,分析结果较好地吻合了文献中的理论和实验结果。

2 FLC-OASLM 的等效电路模型

FLC-OASLM 的典型结构呈三明治状,见图 1。图中所示是一只以氢键非晶硅(a-Si:H)作光敏层,FLC 作光调制层的反射型 OASLM,反射介质为铝(aluminium: Al)金属镜。驱动电压由两端透明电极加载,控制光图像从调制器靠光敏层一侧注入,其中与正脉冲同步注入的为擦除光,与负脉冲同步注入的为写入光。



(a) FLC-OASLM 的截面图
(b) 加载在 OASLM 上的驱动电压及控制光图像

(a) Cross-sectional diagram of FLC-OASLM
(b) Drive voltage and input control image dropped on the OASLM

图 1 FLC-OASLM 的典型结构

Fig. 1 Typical structures of FLC-OASLM

根据图 1 中调制器的物理结构,建立 FLC-OASLM 的等效电路如图 2。图中, V_{in} 是驱动电压,第 I 部分为光敏层等效电路,第 II 部分为 FLC 层等效电路。对于光敏层,注意到半导体 a-Si:H 与 ITO 透明电极和 Al 金属反射镜接触形

成的双肖特基势垒结构,分别用二极管 D_1 、电阻 R_{sh1} 、电流源 I_{ph1} 的并联电路等效 ITO/a-Si:H 接触面和用二极管 D_2 、电阻 R_{sh2} 、电流源 I_{ph2} 的并联电路等效 a-Si:H/Al 接触面。其中, I_{ph1} 、 I_{ph2} 分别是在写入光和擦除光注入时的饱和光电流, R_{sh1} 、 R_{sh2} 分别是二极管 D_1 和 D_2 的反向漏电阻, R_s 是 a-Si:H 本征电阻和对应导电膜电阻之和, C_{a-Si} 是光敏层的几何电容。对于 FLC 层,则根据其端口电特性及液晶分子的运动机制等构造出集总元件形式的等效电路模型^[17, 18]。

图 2,在写入光注入下 ($V_{in} < 0$),二极管 D_1 截止, D_2 导通, FLC 层上的压降 V_{LC} 取决于漏电

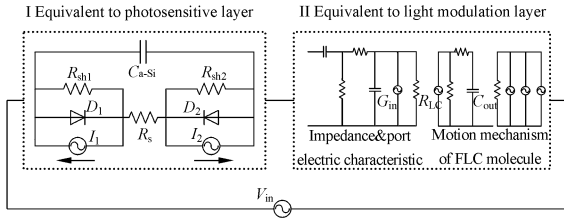


图 2 FLC-OASLM 的等效电路模型

Fig. 2 Equivalent circuit model of FLC-OASLM

阻 R_{sh1} 和光电流 I_{ph1} 。 V_{LC} 达到饱和值的时间常数是 R_{sh1} 和 I_{ph1} 的函数,且 $\tau_1 = f(R_{sh1}, I_{ph1})$ 随控制光强度的增加而减少。若驱动脉冲的持续时间足够长 ($T \gg \tau_1$),则写入光注入时液晶层的饱和压降为

$$V_{LC}(\text{write}) = -R_{LC} |V_{in}| / (R_{LC} + R_{sh1} + R_s), \quad (1)$$

式中, R_{LC} 是 FLC 层的等效电阻。类似地,在擦除光注入下 ($V_{in} > 0$),二极管 D_1 导通, D_2 截止。这时 V_{LC} 取决于漏电阻 R_{sh2} 和光电流 I_{ph2} ,达到饱和值的时间常数 τ_2 是 R_{sh2} 和 I_{ph2} 的函数。在 $T \gg \tau_2$ 情况下擦除光注入后液晶层的饱和压降为

$$V_{LC}(\text{erase}) = R_{LC} |V_{in}| / (R_{LC} + R_{sh2} + R_s), \quad (2)$$

参数 R_{sh1} 、 R_{sh2} 、 I_{ph1} 和 I_{ph2} 的值均与注入光敏层的控制光强度相关,它们与控制光强的对应关系将在下节中给出。不难看出,液晶层上的压降由注入光敏层的控制光图像和加载在 OASLM 上的驱动电压共同调制。控制光图像经光敏层吸收后在液晶层产生相应空间变化的电场分布,同时液晶层中的 FLC 分子排列(指向矢方位)将在电场作用下发生改变,从而完成对读出光的调制。 FLC 的分子排列存在双稳态,控制读出光入射角可使其中一个稳态为消光态,即当液晶分子被调

制到该状态时 OASLM 的输出光强为零(没有光线输出)。与此相应,当液晶分子被调制到另一稳态时输出光强达到饱和值。扭矩平衡方程用于描述 FLC 分子指向矢在外电场作用下的转动机制,在低电压范围内,可以忽略介电张量与电场的耦合作用,平衡方程为^[8]

$$\gamma d\varphi/dt = P_s (V_{in}/d) \cos \delta \cos \varphi + R(\varphi), \quad (3)$$

等式左边是粘滞扭矩, γ 为转动粘滞系数, φ 为指向矢旋转角, t 为时间。等式右边依次是铁电扭矩和恢复扭矩, P_s 为自发极化强度, d 为液晶层厚度, δ 为 FLC 的“ \wedge ”形分子层面倾角。对于 FLC 层的建模,关键在于有效地使用电参量对物理模型进行处理,例如引入可变电流源 G_{in} 刻画因指向矢旋转而引起的电流变化

$$G_{in} = P_s \cos \varphi \cos \delta (d\varphi/dt), \quad (4)$$

在实际处理中,由于 PSpice 提供的 DDT 函数不好用,本文采用积分电容 C_{out} 上电压和电流的非线性关系来处理式(4)中的微分项。模型中 C_{out} 上的电压 $V_{C_{out}} = \varphi \times \pi/180$ 。

3 模拟结果及讨论

取模拟参数如下:驱动电压峰值为 ± 20 V,电压频率、写入光及擦除光的强度将在下面各段中分别给出。光调制层中, $R_s = 2\,500 \, \Omega \cdot \text{cm}^2$, $C_{a-Si} = 5 \, \text{nF}/\text{cm}^2$, R_{sh1} 、 R_{sh2} 、 I_{ph1} 和 I_{ph2} 与注入的控制光强度相关,见图 3。图中控制光强变化范围为 $0 \sim 10 \, \text{mW}/\text{cm}^2$, (a)、(b)、(d)、(d) 中的符号“*、 \diamond 、 \square 、 \circ ”依次对应 R_{sh1} 、 R_{sh2} 、 I_{ph1} 和 I_{ph2} 的实验数据^[9],实线为拟合曲线。液晶层中,自发极化强度 $P_s = 30.6 \, \text{nC}/\text{cm}^2$,转动粘滞系数 $\gamma = 236 \, \text{mPa} \cdot \text{s}$,液晶层厚度 $d = 1 \, \mu\text{m}$,“ \wedge ”形分子层面倾角 $\delta = 18.6^\circ$,晶胞圆锥角 $\theta = 21.5^\circ$,液晶层等效电阻 $R_{LC} = 20 \, \text{M}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ^[8, 17]。设 $V_{in} > 0$ 可调制液晶分子到消光态,则相应的读出光入射角 $\phi = 19^\circ$ 。

3.1 电路模型有效性的验证

为验证电路模型的有效性,在相同参数条件下通过等效电路模型模拟和实验观测^[12]得到输出光强的瞬态响应,分别见图 4 和图 5。由于文中擦除光、写入光以及消光态的定义恰好与文献^[12]相反,因此图 4 中读出光入射角 $\phi = -19^\circ$,且标注的写入光、擦除光分别对应图 5 中的擦除光、

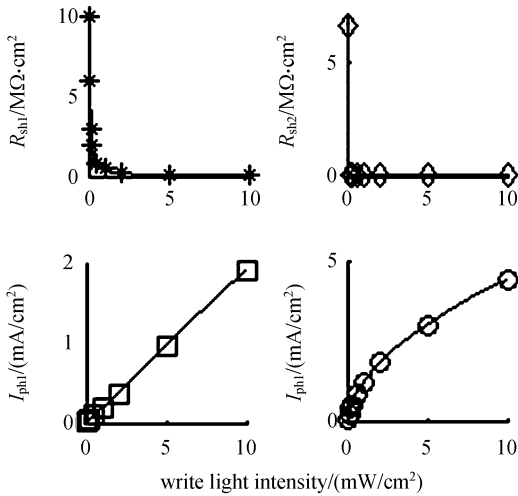


图 3 电路模型中采用的光敏层参数

Fig. 3 Parameters of photosensitive layer used in equivalent circuit model

写入光。图 4 中,当 $V_{in} = 0$ 时,输出光强保持由 FLC 分子指向矢初始方位所决定的初始值;当 $V_{in} < 0$ 时,液晶分子排列被调制到消光态,输出光强由初始值下降为零;当 $V_{in} > 0$ 时,分子排列被调制到另一稳态,这时输出光强上升到饱和值,且上升时间(定义光响应从 10%~90%的时间为上升时间,从 90%~10%的时间为下降时间)随写入光强的提高而增加,写入光强从 0 mW/cm^2 提高到 1 mW/cm^2 使上升时间从 55 μs 增加到 60 μs 。图 4 的模拟结果与图 5 的实验结果在趋势与量级上均一致,说明采用图 2 的电路模型能够较好地实验结果进行预测。

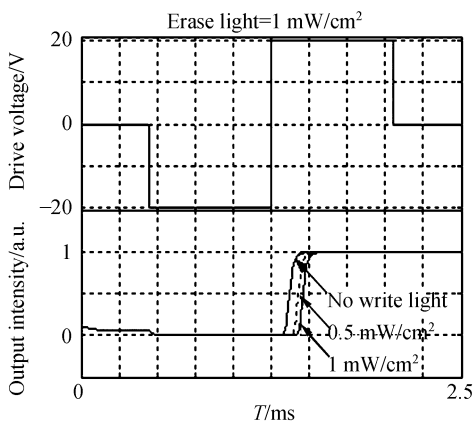


图 4 输出光瞬态响应的电路模型模拟结果

Fig. 4 Simulation results of output-light transient response by equivalent circuit model

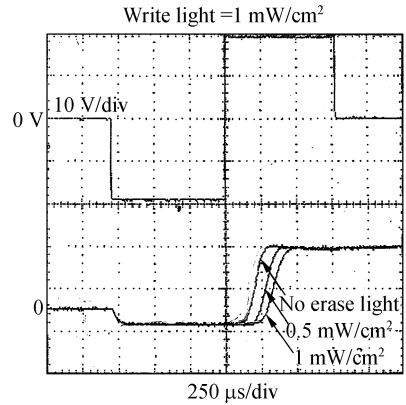


图 5 文献[12]中输出光瞬态响应的实验结果

Fig. 5 Experimental results of output-light transient response reported in reference [12]

3.2 驱动电压频率对灰度响应特性的影响

图 6 是驱动电压频率取 625 Hz,擦除光强取 1 mW/cm^2 时输出光强的瞬态响应,写入周期从 0~0.8 ms 时,曲线按标注依次对应写入光强为 0,1,2,3,5,10 mW/cm^2 的情况。从图中可以看出:(1)输出光强的峰值随写入光强的增加而提高,写入光强超过 2 mW/cm^2 后输出光强达到饱和值;(2)增加写入光强使光响应的上升时间减少,但对下降时间影响微弱,这是由于在光响应下降的 $V_{in} > 0$ 时间内仅有擦除光注入。

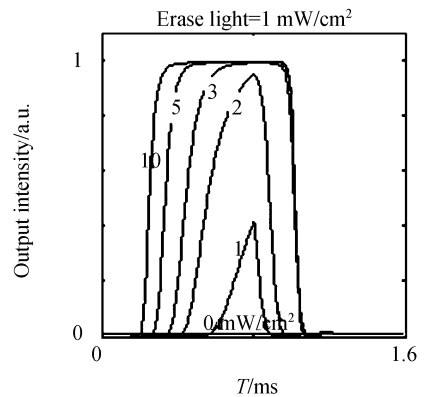


图 6 写入光强为 0,1,2,3,5,10 mW/cm^2 情况下的输出光响应

Fig. 6 Output-light responses for write light intensities of 0, 1, 2, 3, 5, 10 mW/cm^2

图 7 则显示了不同驱动电压频率下上升时间与写入光强间的关系曲线,符号“○、△、◇、*”依次对应频率取 100,200,500 Hz 和 1 kHz 的情况。图中“○、△、◇、*”相互重叠构成一条直线,

反映出在 OASLM 的频率响应范围内, 上升时间随写入光强的增加而减少, 由写入光强取 0.5 mW/cm^2 时的 1.44 ms 减少到取 10 mW/cm^2 时的。图 7 还反映出使输出光强峰值恰好达到饱和的写入光强值随驱动电压频率的增加而提高, 频率从 100 Hz 增到 1 kHz , 写入光强从 0.5 mW/cm^2 提高到 5 mW/cm^2 。

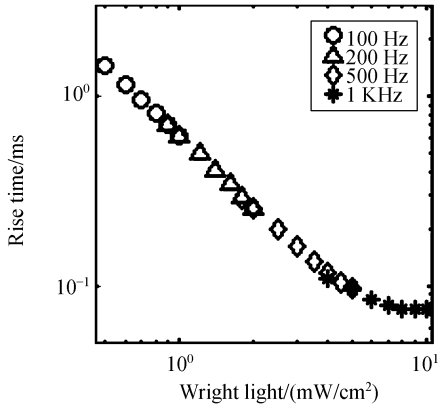


图 7 驱动电压频率为 100、200、500 Hz 和 1 kHz 情况下, 输出光响应的上升时间

Fig. 7 Rise times of output light response for drive voltage frequencies of 100, 200, 500 Hz and 1 kHz

明显地, 由于增加写入光强度加快 OASLM 的光电响应速度(减少响应的上升时间), 输出光的平均强度将得到提高。为分析平均输出光强与写入光强间的对应关系, 以一个周期(写入周期+擦除周期)内的平均输出光强为纵坐标, 写入光强为横坐标, 得到不同驱动电压频率下的强度转移特性曲线如图 8。图中擦除光强取 1 mW/cm^2 , 写入光强的变化范围为 $0 \sim 5 \text{ mW/cm}^2$, 符号“+、*、 Δ 、 \times ”依次对应频率为 100, 200, 500 Hz 和 1 kHz 的情况。不难看出, 写入光强存在阈值 I_{th} 和饱和值 I_s 。当写入光强达到 I_{th} 后, OASLM 开始有光线输出, 超过 I_s 后, 平均输出光强达到饱和。在 I_{th} 与 I_s 之间, 平均输出光强与写入光强几乎呈线性关系。令 OASLM 工作于这一线性段, 即可显示不同灰度。由图 8 还可进一步得出, 强度转移特性对驱动电压频率的变化十分敏感, 增加频率将提高 I_{th} 和 I_s 的值(频率由 100 Hz 增加到 1 kHz , I_{th} 从 0.08 mW/cm^2 提高为 2 mW/cm^2 , I_s 由 1 mW/cm^2 提高为 10 mW/cm^2), 使该线性段在坐标轴上向右平移, 同时使线性段内强度转移特性曲线的斜率减小。并且, 因为提高频率使写

入周期变短, 所以需要注入更高强度的写入光才能获得与未提高频率时相同平均强度的输出光。

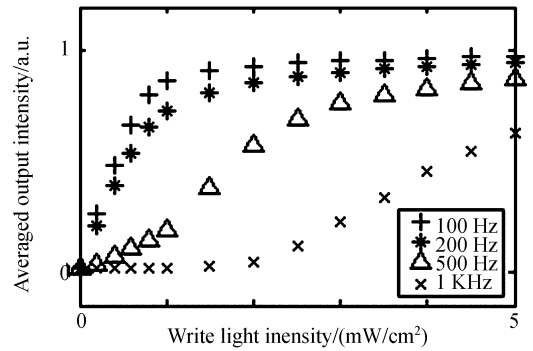


图 8 驱动电压频率取 100, 200, 500 Hz 和 1 kHz 时的强度转移特性曲线

Fig. 8 Intensity transfer characteristic curves for operating frequencies of 100, 200, 500 Hz and 1 kHz

3.3 擦除光对灰度响应特性的影响

图 9 分析擦除光对强度转移特性的影响, 其中驱动电压频率取 500 Hz , 写入光强的变化范围 $0 \sim 10 \text{ mW/cm}^2$, 擦除光强分别取 1 mW/cm^2 和

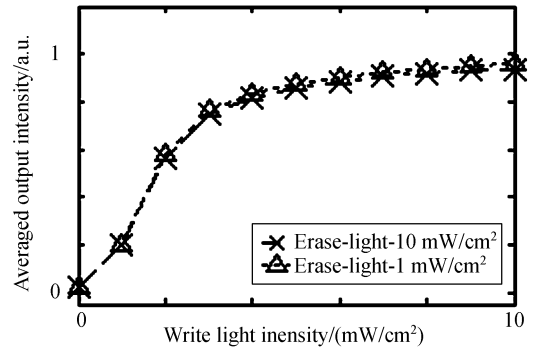


图 9 擦除光强取 10 mW/cm^2 和 1 mW/cm^2 时的强度转移特性曲线

Fig. 9 Intensity transfer characteristic curves for erase-light intensity of 10 mW/cm^2 and 1 mW/cm^2

10 mW/cm^2 。不难看出, 图中两条曲线基本重合, 反映出擦除光对强度转移特性的作用十分微弱。但是擦除光对实现 FLC-OASLM 的灰度响应仍然起十分重要的作用, 见图 10 和 11 (电压频率均取 500 Hz)。图 10 是无写入光注入时输出光强的瞬态响应, 两条曲线分别对应不注入擦除光和注入擦除光的情况。由图可见, 未注入擦除

光时,输出光强达 0.8 a. u.,明显高于所期望的 0 a. u. (无光线输出);在注入 0.08 mW/cm^2 的擦除光后,

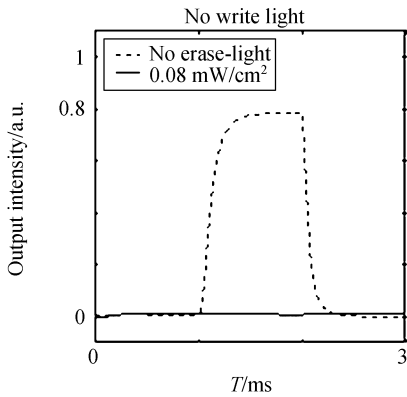


图 10 无写入光注射,擦除光为 0 mW/cm^2 和 0.08 mW/cm^2 时 OASLM 的输出光响应

Fig. 10 Optical responses for erase-light intensities of 0 mW/cm^2 and 0.08 mW/cm^2 when no write-light is injected into OASLM

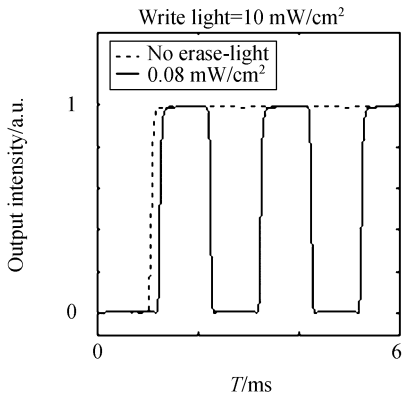


图 11 写入光为 10 mW/cm^2 ,擦除光为 0 mW/cm^2 和 0.08 mW/cm^2 时 OASLM 的输出光响应

Fig. 11 Optical responses for erase-light intensities of 0 mW/cm^2 and 0.08 mW/cm^2 when 10 mW/cm^2 write-light is injected into OASLM

输出光强降为零,说明擦除光能够有效抑制无写入光注入时的非期望光响应。图 11 是注入 1 mW/cm^2 写入光时输出光强的瞬态响应。如图 11 所示,未注入擦除光时,输出光强在擦除周期与写入周期均为 1 a. u.,由于在前一个写入周期写入的信息没有被擦除,所以信息不能被有效识别;在注入 0.08 mW/cm^2 的擦除光后,在擦除周期输出光强降为零,这样在新信息被写入前,先前的信息已被擦除,信息可以被有效识别。

4 结 论

根据 FLC-OASLM 内部的物理结构和调制机制,建立了其等效电路模型。灰度响应特性的模拟结果表明:(1)OASLM 光响应的上升时间与写入光强成反比,写入光强从 0.5 mW/cm^2 增加到 10 mW/cm^2 ,上升时间由 1.44 ms 减少到 $74 \mu\text{s}$;(2)写入光强存在从阈值到饱和值的线性段,在该线性段内输出光强随写入光强(准)线性变化,使 OASLM 工作在该线性段内即可实现灰度输出;(3)强度转移特性对驱动电压频率十分敏感,随着电压频率提高,写入光强的阈值及饱和值增大,灰度区内强度转移特性曲线的斜率以及输出光强减小;(4)强度转移特性曲线对擦除光变化不敏感,但必须注入擦除光才能抑制无写入光注入时的非期望光响应以及在新信息写入前擦除先前的信息。该模型由 FLC 本征电路模型扩展而来,亦可进一步扩展到其它光电混合系统当中,具备较强的普适性和延伸性。它可根据任意给定的驱动电压及控制光图像得到输出光的瞬态响应,拓展了电路模型的应用范围,对开展关于 FLC-OASLM 的研究具有积极的意义,也对其它光电器件的模拟研究做了有益的探索。

参考文献:

- [1] MIAS S, COLLINGS N, WILKINSON T D, *et al.*. Spatial sampling in pixelated-metal-mirror ferroelectric-liquid-crystal optically addressed spatial-light-modulator[J]. *Opt. Eng.*, 2003, 42(7): 2075-2081.
- [2] de BOUGRENET J L, de TOCNAYE L A, BROCKLEHURST J R. Parallel access read/write memory using an optically addressed spatial light modulator[J]. *Appl. Opt.*, 1991, 30: 179-180.
- [3] SUN D G, LIU Z F, HO S T, *et al.*. Electro-optic modulators with self-assembled superlattice waveguides[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(4): 386-392.

- [4] 王晓东, 刘文耀, 金月寒, 等. 基于 DSP 和 CPLD 的激光雷达图像采集和显示集成系统[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 190-194.
WANG X D, LIU W Y, JIN Y H, *et al.*. Laser radar image acquisition and display integrated system based on DSP and CPLD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 190-194. (in Chinese)
- [5] 王玉荣, 徐鹏, 王青圃, 等. 光电混合联合变换相关器中各元器件结构参数之间的关系[J]. 光学精密工程, 2005, 13(3): 376-384.
WANG Y R, XU P, WANG Q P, *et al.*. Relationship between parameters in hybrid optical/electronic joint transform correlator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(3): 376-384. (in Chinese)
- [6] HUANG SH L, YAN X, ZHANG J, *et al.*. Optical characteristic analysis of grating moving light modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 749-753.
- [7] 刘伯晗, 张健, 吴丽莹. 液晶空间光调制器的纯相位调制特性研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 213-217.
LIU B H, ZHANG J, WU L Y. Research of the phase-only modulation characterization of a liquid crystal spatial light modulator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 213-217. (in Chinese)
- [8] 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 铁电液晶光电响应特性的电路级模拟[J]. 电子学报, 2002, 30(5): 708-710.
PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al.*. Circuit-level model of photoelectricity response in ferroelectric liquid crystal[J]. *Acta Electron. Sinica*, 2002, 30(5): 708-710. (in Chinese)
- [9] MIAS S, MANOLIS L G, COLLINGS N, *et al.*. Phase-modulating bistable optically addressed spatial light modulators using wide-switching-angle ferroelectric liquid crystal[J]. *Opt. Eng.*, 2005, 44(1): 1-7.
- [10] 周立兵, 罗风光, 曹明翠. 2×2 自对准光开关结构及设计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 64-66.
ZOU L B, LUO F G, CAO M C. Structure of 2×2 fiber-optic switch with self-aligning and its design[J]. *J. Huazhong Univ. Sci. Technol.*, 2005, 33(12): 64-66. (in Chinese)
- [11] 王梦遥, 潘炜, 罗斌. 铁电液晶空间光调制器响应特性的研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2004, 10(4): 489-492.
WANG M Y, PAN W, LUO B. Study of the respondent characteristics in ferroelectric liquid crystal spatial light modulator[J]. *J. Funct. Mater. Dev.*, 2004, 10(4): 489-492. (in Chinese)
- [12] PeRENNÈS F, CROSSLAND W A. Optimization of ferroelectric liquid crystal optically addressed spatial light modulator performance[J]. *Opt. Eng.*, 1997, 36(8): 2294-2301.
- [13] TANAKA Y, TAKIMOTO A, OGAWA H. Analysis of charge-controlled grey scale in ferroelectric liquid crystal optically addressed spatial light modulator[J]. *Jap. J. Appl. Phys.*, 1994, 33(6A): 3469-3477.
- [14] LANDRETH B, MODDEL G. Gray scale response from optically addressed spatial light modulators incorporating surface-stabilized ferroelectric liquid crystals [J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(20): 3937-3944.
- [15] 李诺晗, 潘炜, 罗斌. VCSOA 典型参数特性的电路级分析 [J]. 固体电子学研究与进展, 2004, 24(2): 233-237.
LI N H, PAN W, LUO B. Circuit-level analysis on the VCSOA typical parameter properties[J]. *Res. Prog. Solid State Electron.*, 2004, 24(2): 233-237. (in Chinese)
- [16] SHI X M, MA J G, YEO K S, *et al.*. Equivalent circuit model of on-wafer CMOS interconnects for RFICs[J]. *IEEE Trans. VLSI Syst.*, 2005, 13(9): 1060-1071.
- [17] 潘炜, 张晓霞, 罗斌, 等. 铁电液晶显示器记忆特性的 Pspice 可视化分析[J]. 光电子·激光, 2002, 13(6): 571-574.
PAN W, ZHANG X X, LUO B, *et al.*. Visual analysis on memory properties of ferroelectric liquid crystal displays in Pspice[J]. *J. Optoelectron. Laser*, 2002, 13(6): 571-574. (in Chinese)
- [18] WANG M Y, PAN W, LUO B, *et al.*. τ - V_{\min} addressing mode and an improved equivalent circuit model for ferroelectric liquid crystal displays[J]. *IET proc. Optoelectron.*, 2007, 1(1): 16-22.