

文章编号: 1007-2780(2010)02-0200-05

基于光强选通成像的液晶透过谱研究

唐远河¹, 张瑞霞¹, 刘汉臣², 刘术林³, 刘 锴¹,
郜海阳¹, 杨旭三¹, 赵高翔⁴, 李 卿⁴, 梁 元⁴, 叶 娜⁴

(1. 西安理工大学 理学院, 陕西 西安 710048, E-mail: ltp1801@163.com;

2. 西安工程大学 理学院, 陕西 西安 710048; 3. 北方夜视技术股份有限公司 西安分公司, 陕西 西安 710065;

4. 西安理工大学 自动化学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 为了更好地将液晶器件应用于选通成像系统中, 从理论上推导出了液晶器件透过率与波长、折射率、电压之间的关系。从双折射率与光强的关系定量分析了扭曲向列相液晶的色散效应。用光栅光谱仪选择 380~1 100 nm 波段, 以 SONY 公司 LCX023CMT 型号的 TFT-LCD 为样品, 测试了液晶器件在不同灰度级和波长下的透射率。研究结果表明: 液晶器件在可见光波段色散较小, 随着灰度值的增加, 色散增大; 通过自制的光强局部选通成像系统对同一物体进行了对比拍摄, 选通后的照片表明液晶器件的色散对成像质量影响不大; 该液晶器件对红外光线有近 12% 的透过率, 证明其可以实现近红外波段的强光局部选通成像。

关 键 词: 液晶; 色散; 选通成像

中图分类号: TN141.9

文献标识码: A

LCD Transmission Spectrum Based on Light Intensity Gated Imaging

TANG Yuan-he¹, ZHANG Rui-xia¹, LIU Han-chen², LIU Shu-lin³, LIU Kai¹,
GAO Hai-yang¹, YANG Xu-san¹, ZHAO Gao-xiang⁴, LI Qing⁴, LIANG Yuan⁴, YE Na⁴

(1. School of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China, E-mail: ltp1801@163.com;

2. School of Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

3. Xi'an Branch, North Night Vision Technology Co. Ltd., Xi'an 710065, China;

4. School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to better apply LCD to the gated imaging system, based on the electro-optic effect of LCD, the relationships between transmittance and wavelength, birefringence index, voltage are derived theoretically. The dispersive of twisted nematic liquid crystal is quantitatively analyzed from the relationship of effective birefringence and transmittance. By the grating spectrometer, the transmittance of liquid crystal is measured and analyzed using Sony LCX023CMT TFT-LCD at 380~1 100 nm wavelength and altering grey level from 0 ~ 255 in this experiment. It was found that the LCX023CMT LCD has a low dispersion within the visible light. But dispersion increased along with the gray level. Two pictures have been shot under same environment by self-made partial gated imaging system or without which are contrasted each other, and there is little dispersive effect which can not affected the imaging quality. The partial light intensity gated can be realized for the strong near infrared by its 12% transmittance.

Key words: liquid crystal; dispersion; gated imaging

收稿日期: 2009-08-23; 修订日期: 2009-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10874138); 陕西省教育厅项目(No. 09JK653); 西安理工大学联合基金资助项目

作者简介: 唐远河(1965—), 女, 四川蓬溪人, 博士, 教授, 从事卫星遥感探测大气风场及强光选通成像、微光增强成像等方面的研究。

1 引言

对液晶材料进行电光调制,可以实现双折射、旋光、干涉及光散射等方面的应用。空间光调制器(Spatial Light Modulator,SLM)是实时光学信息处理的重要器件。近年来,集成薄膜晶体管阵列液晶显示器(Thin-Film-Transistor Liquid Crystal Display,TFT-LCD)越来越广泛地应用于光电混合信息处理系统之中^[1,2]。LCD 不仅在投影、电视、监视器等显示系统方面有广泛的应用,在成像光学系统中也有非常重要的应用价值。LCD 的光学调制是一种振幅和位相的耦合,现在已有许多学者对此进行了研究^[3-5]。由于各种 LCD 的混合调制特性差异很大,所以若要将商用 LCD 用于光学信息处理系统,必须对相应型号 LCD 的光学调制特性进行实际测试。

在前期研究中,作者所在课题组已经设计制造出基于 TFT-LCD、单个像素自动控制光强的局部选通成像系统,即控制单个像素的透过率使探测物的局部光强选择性地通过后成像。在可见光波段的局部选通成像实验表明,当使用光强大于 $2.2 \times 10^5 \text{ lx}$ 的强光照射物体时,可实时拍摄得到高光部位细节分辨率非常好的照片,图像对比度好,成像质量得到提高,光强的动态范围也得以扩大^[6-10]。

液晶折射率的双向异性导致其呈现许多独特的光学性质。色散特性反映液晶材料的折射率随光波长的变化,而色散特性直接影响选通成像的像质。本文对所使用的 TFT-LCD 在可见光和近红波段的色散特性及其对成像质量的影响进行了研究。

2 液晶电光调制特性的理论计算

所使用的 TFT-LCD 液晶是扭曲向列相(Twisted Nematic,TN)显示模式。出射光通过外电场(驱动电压)来调制。TFT-LCD 每个像素的开关都有一个独立的 TFT 控制,通过施加不同的电信号可控制各像素的灰度从而实现调光的调制。TFT-LCD 可直接由微机视频显示信号驱动。对于数字图像的单个像素来说,其灰度级和电压之间有负斜率的线性关系^[11]。在不同电压(灰度级)的作用下,不同波长的光的透射率不同。液晶的这种色散特性主要与双折射 Δn 有关。

用白光照射液晶板,不同波长的光通过相同厚度的液晶层,由于双折射的效果导致不同波长的光透射率各不相同,产生色散^[12],从而降低液晶选通探测器的成像对比度。

当液晶基片上有外加电压 V 时,所有液晶分子朝电场方向转过一个角度 θ , θ 与 V 的关系为^[13]:

$$\theta = \begin{cases} 0 & (V \leq V_c) \\ \frac{\pi}{2} - 2\arctan\left[\exp - \left|\frac{V - V_c}{V_0}\right|\right] & (V > V_c) \end{cases} \quad (1)$$

其中 V_c 是阈值电压, V_0 是某一中间值电压(即 $\theta = 49.5^\circ$ 的电压)。随着分子取向的转变,光沿 z 轴传播的折射系数 n_e 发生变化。根据折射率椭圆得出沿入射光方向上的有效折射率为:

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \theta + n_e^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

其中 n_o 、 n_e 分别为寻常光、非常光的折射率。由式(1)、(2)可知,通过改变加在液晶像素上的电压,可以改变入射光的偏振态。当光离开液晶后,寻常光与非寻常光两分量有位相差:

$$\delta(V, \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^d \{n[\theta(V), \lambda] - n_o\} dz \equiv \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n(V, \lambda) \quad (3)$$

其中 d 为液晶厚度, $\Delta n(V, \lambda)$ 是液晶的双折射率,它是入射光波长 λ 、电压 V 的函数。当位相差 δ 满足干涉加强的条件时,产生的光强为:

$$I = E^2 \left[\cos^2 \chi - \sin 2\varphi \sin 2(\varphi - \chi) \sin^2 \frac{\delta}{2} \right] \quad (4)$$

式中 χ 是液晶片两边的起偏器与检偏器之间的夹角, φ 为液晶光轴与起偏器透射轴之间的夹角。当检偏器与起偏器相互垂直($\chi = \pi/2$)时,式(4)变为:

$$I_{\perp} = E^2 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (5)$$

亦即,当把检偏器和起偏器垂直放置时,液晶盒透射光强的变化关系为:

$$I(\lambda) = I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{d[n_o(\lambda) - n_e(\lambda)]\pi}{\lambda} \quad (6)$$

对垂直液晶层入射波长为 λ 的光,寻常光和非寻常光之间产生的相位差如式(3)所示。在一定温度下,假设式(3)中的 $\Delta n(V, \lambda)$ 与波长、电压满足如下关系:

$$\Delta n(V,\lambda) = \Delta n_0(\lambda) f(V)$$

(7)

其中 $\Delta n_0(\lambda)$ 是液晶在某一温度和波长 λ 、电压 $V=0$ 条件下的双折射率, $f(V)$ 是液晶双折射率随电压变化的函数。一般而言, $f(V)$ 不是线性函数,但在电压不高于临界电压 V_{th} 时, $f(V)$ 可近似表达为线性函数:

$$f(V) = a - bV$$

(8)

由式(7)和式(8)可得:

$$\Delta n(V,\lambda) = (a - bV) \Delta n_0(\lambda)$$

(9)

在一定波长照射下,双折射率 Δn 随电压的增加而减小。由于用视频信号驱动液晶板,所以给液晶板输送的灰度值可用电压来代替。电压和灰度之间是单调递减的线性关系,所以在某一波长下,双折射率 Δn 随灰度级的增加而增加。同时,在一定的灰度级下,向列相液晶的双折射率 Δn 随波长的增加而减少。

3 实验测试及分析

3.1 液晶透过率随波长的变化

利用 SBP300 光栅光谱仪和溴钨灯测量液晶在 380~1 100 nm 波长范围内的透过率,实验装置如图 1 所示。给液晶盒输送 $N=[0, 32, 64, \dots, 224, 255]$ 的灰度级条件,测量 380~1 100 nm 波长范围内透过偏振片与液晶盒后的光强,其中偏振片的工作波段为 400~680 nm,得到图 2 所示的不同灰度级下液晶透过率随波长的变化曲线。

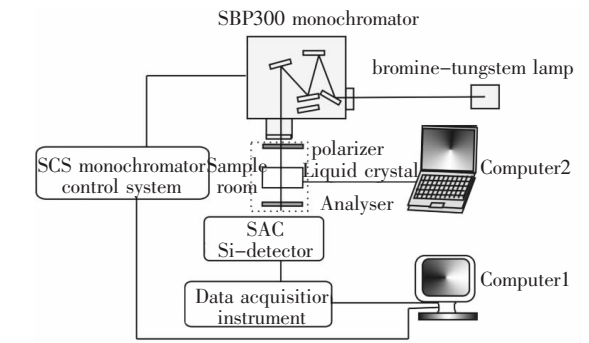


图 1 TFT-LCD 电光效应的测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of testing system of TFT-LCD electro-optic effect

从图 2(a)可见,400~680 nm 波段,灰度值在 0~64 之间的透过率几乎为零,说明在这个灰度范围所对应的电压为饱和电压,90°旋光性消失,液晶的双折射率 Δn 变为零。在 400~700 nm 波段,0~160 灰度值的曲线较平坦,说明在此波

段范围的色散很小,但随着灰度值的增加,192~255 灰度值的曲线变陡,即色散相对变大。图 2(b)中,近红外波段随着灰度值的变化波段透过率变化不大,变化范围为 10%~12%,与可见光不加偏振片的透过率接近。从图 2 还可以看出液晶的波长响应具有非线性关系。图 2(a)中,700 nm 左右波段透过率突然上升的原因将在以后继续研究。

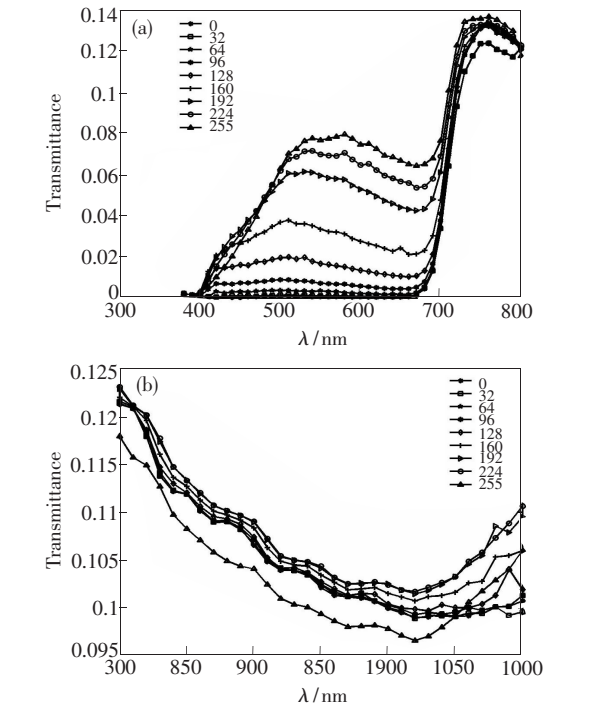


图 2 不同灰度级下 TFT-LCD 透过率随波长的变化关系。(a)380~800 nm; (b)800~1 100 nm.

Fig. 2 Relation of TFT-LCD transmittance and wavelength for different grey level. (a)380~800 nm; (b)800~1 100 nm.

3.2 液晶透过率随灰度级的变化

在液晶盒上加不同的灰度值亦即加不同电压,做出不同波段下的灰度-透射率曲线如图 3 所示。由图 3 可知:随着灰度的增高,可见光所对应曲线的灰度明显增加,说明在可见光范围内,此液晶盒可以通过灰度改变来调制光线经过液晶的透过率,亦即光强调制。这为作者所在课题组前期研究中利用液晶在可见光波段进行光强局部选通成像提供了进一步的光谱实验证明。

液晶板本身随波段变化的透过率曲线如图 4 所示,曲线表明此液晶材料在可见光范围内的吸收效应最小,在近红外的吸收也不大。图 4 还表明,在 800~1 100 nm 近红外波段,利用这块 TN

型液晶板还可以实现红外线强光的选通功能,即在红外成像中,当非常强的红外线进入成像系统时,通过驱动电路控制液晶单像素的通过率,能将非常强的红外线降低近 12% 的照度(如图 4 所示),而正常照度和低照度的红外线进入成像系统时,可以不经液晶的选通调制限制。这样,利用液晶的选通功能就可以得到对比度非常好的红外选通照片,红外选通成像系统将是下一步的研制工作。

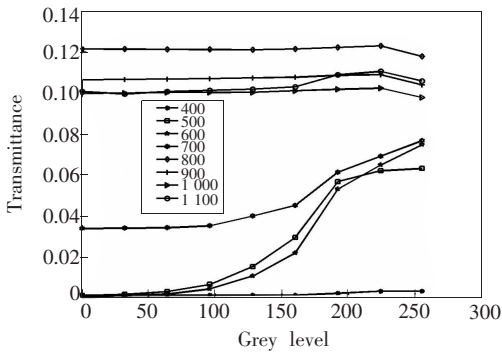


图 3 不同波长下 TFT-LCD 透过率随灰度值的关系
Fig. 3 Relation between transmittance of TFT-LCD and grey level for different wavelength

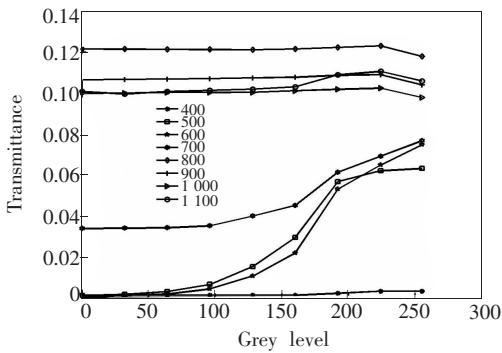


图 4 TFT-LCD 随波长的透过率曲线
Fig. 4 Transmittance of TFT-LCD vs. wavelength

3.3 色散对液晶局部选通成像的影响

根据图 2 的实验结果,成像选通探测器中采用数字控制系统不仅可以避免非线性给控制带来的麻烦,而且还能够达到高精度、智能控制。液晶在可见光范围内色散相对较小,所以用此液晶板进行光强选通成像时就不必担心色散问题。图 5 是利用上述液晶自制的对光强单像素选通控制前、后所得到的对比照片,图 5(a)是用强光照射下拍摄的曝光过度的小猫照片(Canon EOS 400DCCD 相机配适马 17.0~70.0 mm 镜头,手动曝光模式,70 mm 焦距,f/4.0 光圈,正常模式,自动白平衡,准场景拍摄),图 5(b)是加了 TFT-LCD 而其他条件不变所得到的局部选通照片。可以看出,经局部选通后,照片的细节得到了很好的体现。相对于电子快门的整体选择光强,选通成像系统的优点是可以单像素局部选通成像,能够显现出高光的局部细节,缓和照片的对比度;而电子快门是对图像整体改变光照程度,不能改变强弱对比度。

图 5(b)的小猫照片是局部选通的成像结果,即各个部位的灰度值不同。图 5(b)I 处的眼部黑色部位加的灰度值(在 192~255 之间)大,所以色散现象相对明显,这与图 3(a)实验结果所述的随着灰度值的增加色散增大的结果相吻合,但从总体来讲色散对成像质量影响并不大。图 5(b)的边缘放大图 II、III 和 IV 处出现的紫色边缘,是由于光照环境的高反差、强逆光引起的色散。

这些色散是因为反馈信号没有很好地识别小猫光照弱的部位和小猫的黑色眼睛、胡须引起的,可以从软件上改进,对选通图像进行准确的采集和处理从而消除类似的色散,在严格要求色彩纯真还原的照片中进行消色差处理。

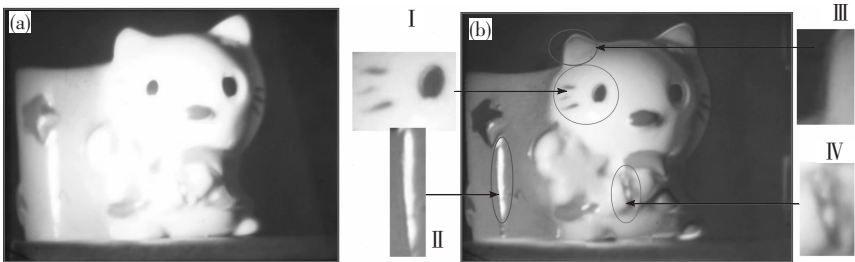


图 5 基于液晶的局部选通成像照片的比较。(a)正常拍摄照片;(b)选通拍摄照片。
Fig. 5 Comparison of the partial gated images based on LC plate. (a) Shooting under the normal model; (b) Shooting under the gated model.

4 结 论

通过理论分析和实验测试,研究了 TFT-LCD 在可见光和近红波段的色散特性及其对成像质量的影响,得出如下结论:

(1)通过不同灰度光谱透过率和小猫照片的对比实验,证明 TN 液晶板在可见光范围内实现光强局部选通的成像质量很好,在 0~160 灰度值范围内色散很小,而 192~255 灰度值色散相对增

大,但对成像质量的影响不大。

(2)当灰度值在 0~64 时,液晶分子轴与电场方向一致,入射光沿光轴方向传播,这时的液晶相当于各向同性晶体,不再有双折射,透射谱也变宽,通过调节加在液晶盒上的电压(灰度级),可控制某种光的透过率,对波段选通具有很好的指导意义。

(3)液晶层可以对非常强的红外线降低近 12% 的照度,表明 TFT-LCD 配红外偏振片,可以实现红外强光的局部选通成像。

参 考 文 献:

- [1] Schonbrun E, Piestun R, Jordan P, *et al.* 3D interferometric optical tweezers using a single spatial light modulator [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(1):3777-3786.
- [2] 徐鹏,王玉荣. 集成薄膜晶体管液晶空间光调制器光调制特性的实验研究[J]. *液晶与显示*, 2005, 20(5):412-415.
- [3] Mohammad Sultan Mahmud, Izabela Naydenova, Vincent Toal. Implementation of phase-only modulation utilizing a twisted nematic liquid crystal spatial light modulator [J]. *Appl. Opt.*, 2008, 10(8):1-6.
- [4] Andrés Márquez, Claudio Iemmi, Ignacio Moreno, *et al.* Anamorphic and spatial frequency dependent phase modulation on liquid crystal displays Optimization of the modulation diffraction efficiency[J]. *Opt. Express*, 2005, 13(1):2111-2119.
- [5] 姜宝光,穆全全,曹召良,等. 液晶波前校正器校正水平方向上的大气湍流[J]. *液晶与显示*, 2009, 24(3):396-398.
- [6] 唐远河,张瑞霞,刘锴,等. 一种基于液晶自动控制光强实现局部选通的探测器:中国, CN101368846 [P]. 2009-02-18.
- [7] 唐远河,李卿,刘锴,等. 基于 HTPS 液晶板的局部选通探测器:中国, ZL200810232000.9 [P]. 2010-01-27.
- [8] 唐远河,赵高翔,刘锴,等. 光电成像系统高宽容度液晶选通电荷耦合器件及制备方法:中国, ZL200810232003.2 [P]. 2009-12-17.
- [9] 梁元,唐远河,刘锴,等. 一种基于液晶的单镜头局部选通成像探测器:中国, CN101576410 [P]. 2009-11-11.
- [10] Zhang Ruixia, TangYuanhe, Liu Kai, *et al.* Partial gating image intensifier based on liquid crystal auto-controlling light intensity [J]. *Proc. of SPIE*, 2008, 72790:72790T(1-7).
- [11] Marquez A, Iemmi C, Moreno I, *et al.* Quantitative prediction of the modulation behavior of twisted nematic liquid crystal displays based on a simple physical model [J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40(10):2558-2564.
- [12] 黄翀,周学平,欧阳艳东,等. 液晶光阀的电光色散特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(3):540.
- [13] 赵阶林,任广军. 液晶电控效应的实验研究[J]. *液晶与显示*, 2006, 21(4):384-387.