

氦氛激光下彩色液晶电视的透射率研究*

竺子民 冯 辉 阮 玉

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

提要 在氦氛激光中使用彩色液晶电视需要澄清红、绿、蓝三分量对透射率的贡献。实验表明,红、绿分量在相当大的范围内有近似线性,绿分量甚至比红分量的贡献更大,而蓝分量的贡献较小。利用三色滤光片透射光谱的重叠性质和液晶的非线性,可以减少激光下彩色液晶电视的分辨率的下降。除此以外,还发现红、绿、蓝三分量之间存在着很强的相互作用,只有综合考虑亮度和三分量之间的相互关系,才能最大限度地发挥彩色液晶电视在相干光照射下显示灰度图像的能力。

关键词 液晶电视,空间光调制器,彩色

1 引 言

液晶电视(LCTV)从八十年代起作为空间光调制器被广泛用于光学信息处理系统^[1-6],它的特点是价格较低,是一般电寻址液晶光阀的十分之一,易于为普通实验系统接受。LCTV有黑白(GLCTV)和彩色(CLCTV)之分,对于光学信息处理系统来说,所用光源一般是相干光,对色彩没有要求,所以用GLCTV比较合适。由于市场需求的原因,大量生产的是CLCTV,随着时间的推移,国内外市场上GLCTV越来越难于买到,特别在国内,目前只有CLCTV销售,其价格与国外市场上的GLCTV相比,差别不是很大。所以用CLCTV作为空间光调制器既是条件所限,也为价格所允许。

LCTV一般同时对入射光进行强度和位相调制^[7,8],我们关心的仅为强度调制,例如在合成全息中的应用等。已有文献大都围绕GLCTV进行,选用CLCTV后面临的问题是:如果拆除滤色片,能否使CLCTV的分辨率与GLCTV一样?如果保存滤色片,分辨率可以做到什么程度?要回答这些问题,必须搞清氦氛激光下各彩色分量对透射率的贡献,它们之间的相互作用,以及适当的编码方式等。这些正是本文要研究的内容。

2 分 析

扭曲向列相型液晶是一种各向异性的光学材料,在局部小范围内,可以把它看成一种单轴晶体,其光轴方向平行于分子的长轴。透射式彩色液晶扭曲向列相型液晶器件由两个玻璃板夹液晶层组成。玻璃板内镀有透明导电电极,分成像素电极和公共电极。公共电极下是彩色滤光

* 湖北省自然科学基金资助项目。

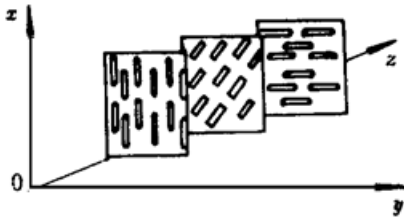


图 1 扭曲向列相液晶分子的排列

Fig. 1 Arrangement of twisted nematic liquid crystal molecules

片, 分别是红、绿、蓝(R, G, B)三色, 每一组 RGB 对应一个像素。如图 1 所示, 沿 z 方向入射的光线经起偏器后变成线偏光, 无电场时, 液晶分子保持这种螺旋状分布不变, 入射线偏光的偏振方向随分子取向而逐渐扭曲, 偏振方向恰与检偏器偏光轴垂直, 没有光出射; 有电场时, 液晶层中央的分子倾向于平行外电场排列, 当电压大于某一阈值后, 除了约束在玻璃表面附近的部分分子以外, 整个液晶层的分子都将沿外电场排列, 此时液晶层不再使入射的线偏光偏振面扭曲, 出射光偏振方向与检偏器偏光轴平行。

设起偏器和检偏器的偏光轴与 x 轴的夹角分别为 ψ_1 和 ψ_2 , 一个厚度为 d , 扭曲角度为 90° 的扭曲向列相型液晶材料, 在 $z = 0$ 处分子长轴与 x 轴平行, 加上周期为 T , 电压均方值为

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt}$$

的脉冲外电场后, 设所有分子与外电场的夹角为 θ , 这个 θ 值由下式确定

$$\theta = \begin{cases} 0 & V_{rms} \leq V_c \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[\exp \left[- \left| \frac{V_{rms} - V_c}{V_0} \right| \right] \right] & V_{rms} > V_c \end{cases}$$

这里 V_c 是阈值电压, $V_{rms} < V_c$ 不引起分子倾斜; V_0 是盈电压, $V_{rms} = V_0$ 对应于 $\theta = 49.6^\circ$ 。记

任一彩色子像素由于彩色滤光片引起的振幅透射率为 $\sqrt{C_i}$, $i = 1, 2, 3$ 分别对应于红、绿、蓝三种滤色片。如果入射光的 x, y 分量分别是 x_1, y_1 , 出射光为 x_2, y_2 , 则

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \sqrt{C_i} \times \exp(-j\phi) \begin{bmatrix} \frac{\pi \sin \gamma}{2\gamma} \cos \psi_1 \cos \psi_2 + \left[\cos \gamma + j \frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \right] \sin \psi_1 \cos \psi_2 \\ \left[-\cos \gamma + j \frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \right] \cos \psi_1 \sin \psi_2 + \frac{\pi \sin \gamma}{2\gamma} \sin \psi_1 \sin \psi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix}$$

式中, $\beta = \frac{\pi d [n_c(\theta) - n_0]}{\lambda}$, $\phi = \frac{\pi d [n_c(\theta) + n_0]}{\lambda}$, $\gamma = [(\pi/2)^2 + \beta^2]^{1/2}$, 而 $n_c(\theta)$ 和 n_0 满足以下关系

$$\frac{1}{n_c^2(\theta)} = \frac{\cos^2(\theta)}{n_c^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_0^2}$$

透射光的强度为

$$T = C_i \times \left[\frac{\pi \sin \gamma \cos(\psi_1 - \psi_2)}{2\gamma} + \cos \gamma \sin(\psi_1 - \psi_2) \right]^2 + C_i \times \left[\frac{\beta \sin \gamma \sin(\psi_1 + \psi_2)}{\gamma} \right]^2 \quad (1)$$

根据(1)式算得的电压与透射率关系见图 2, 这里假定 C_i 为 1.0。

3 实 验

为验证以上分析, 并找出器件在相干光照明下的实际特性, 我们进行了如图 3 所示的实验。氦氛激光经扩束准直后投射在 CLCTV 上, 所用

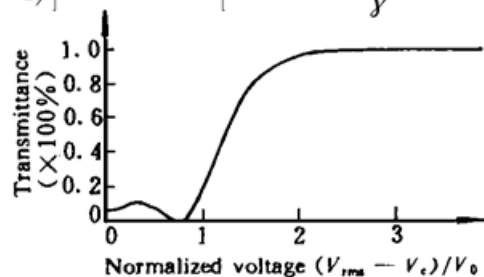


图 2 归一化电压与透射率的关系

Fig. 2 Relation of normalized voltage and transmittance

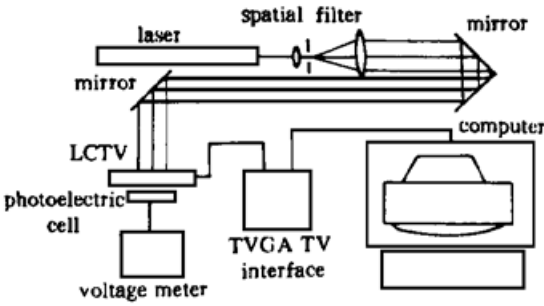


图 3 实验装置
Fig. 3 Experimental setup

CLCTV 为 Casio TV-480, 扭曲向列相型, 高品质矩阵驱动, 像素点阵为 110×119 , 有效显示面积为 33.32×45.11 (mm)。每个像素由红绿蓝三个单元组合而成, 每个单元的尺寸为 0.3×0.126 (mm), 依红绿蓝的顺序从左至右排列。液晶屏后有一块乳化玻璃散射屏, 加此屏后能在液晶屏上看到清晰图像, 但透射光向各个方向发散, 如其后要加光学系统对液晶屏成像, 则参与成像的能量甚少, 故必须拆除。CLCTV 的视频信号由 VGA-TV 接口提供, 该接口的输入信号从微机传来。微机工作在标准 VGA 图形

方式, 即 320×200 像素, 256 种彩色, 红、绿、蓝三分量的取值范围从 0 至 63, 假定三分量的取值正比于 CLCTV 的归一化电压, 即 R (或 G, B) = $k(V_{rms} - V_c)/V_0$, 为方便起见, 在下面的分析中, 不再用归一化电压而用 R (或 G, B) 来描写单一分量的信号大小。一块组合光电池板紧靠 CLCTV 放置, 它接受的 CLCTV 透射光电信号由微电压计读出。CLCTV 有亮度和色调两个调节旋钮, 色调调节作用不大, 亮度 (Lightness, 简记为 L) 调节则起着至关重要的作用。图 4 是红、绿、蓝三分量均为零时, 调节亮度得到的不同相对透射率 T (透射率与最大透射率之比)。由图中实线所连接的小棱形是测量数据, 可见, 适中亮度 ($L = 4, 5$) 的透射率最低。

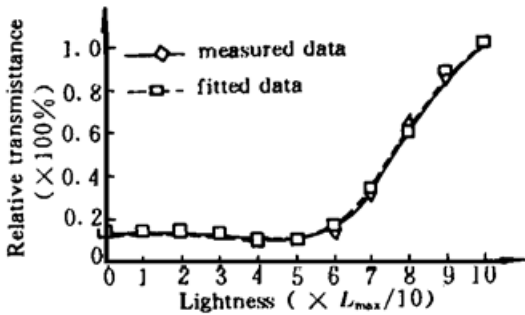


图 4 $R = G = B = 0$ 时的亮度和透射率关系
Fig. 4 Relation of lightness and transmittance under $R = G = B = 0$

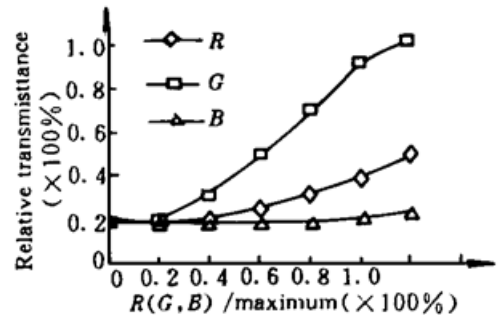


图 5 $L = L_{max}/2$ 时单个彩色分量对透射率的影响
Fig. 5 Effect of a single component on the transmittance ($L = L_{max}/2$)

记亮度的最大值为 L_{max} , 图 5 给出了亮度为 $L_{max}/2$ 时三分量信号值各自增加 (其它分量信号为零) 对光强透射率的影响。由图可见以下几点: (1) 分量在 5 到 60 的取值范围内, 透过率的变化几乎是连续的, R (或 G, B) 每改变一个最小步长 (这里是 1), 透过率都有所变化; (2) 亮度为最大亮度一半时, 各分量都是单调递增的, 与理论计算的图 2 曲线线性部分相吻合; (3) 对光强透过率影响的强弱依次为绿、红、蓝。

第 (1) 点表明这种器件的灰度表现力较好, 第 (2) 点说明前面推导的结论在这一亮度值下是适用的; 第 (3) 点说明实际滤色片的透射谱是相互重叠的, 且对于波长为 633 nm 的氦氖激光, 其透射峰位于绿色滤光片的透射范围内, 正是这一点为减少 CLCTV 的分辨率损失提供了可能。下面还要对此作进一步说明。

亮度 L 调节的重要性可从图 6 看出。该图描写 $L = L_{max}/10$ 时透射率与单红分量的关系, 可见整个 R 取值范围内透射率均为负, 这意味着加上红色信号比不加任何信号的透射率还低,

而且随着 R 的增加, 透射率进一步下降。绿和蓝色分量也有类似情况。不仅如此, 随着 L 的改变, 红、绿、蓝三分量之间的关系也发生着显著变化, 图 7 是 B 一定、 $L = L_{\max}/2$ 时 R, G 与透射率的关系, 可见, R, G 两分量除了最高值的一小块区域外, 它们各自的增长基本上在整个取值范围内提高了透射率, 它们之间也基本上是相长的。但是, 在其它的 L 下, 特别是低亮度时, 在相当大的范围内 R, G 两分量之间是相互抑制的, 即两个分量共同作用反而比单个分量更降低透射率。由此可见, CLCTV 的相干光强透射率 T 受三分量信号电极和扫描电极之间的串扰, 以及亮度的制约, 是 R, G, B 和 L 的复杂函数。根据实验结果, 不难得到 L 和 RGB 的拟合关系。

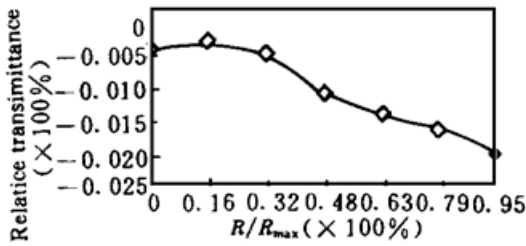


图 6 低亮度时红分量的透射率

Fig. 6 Transmittance of the red component under low lightness

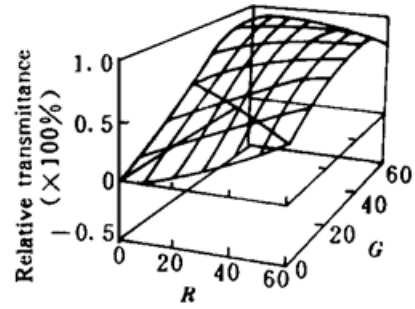


图 7 红绿分量的相互关系 ($L = L_{\max}/2, B = 20$)

Fig. 7 Relation of transmittance of the red component R and the green component G ($L = L_{\max}/2, B = 20$)

现在来说明提高分辨率的编码方法。理想情况下, 每个像素的地址和赋值都是唯一的, 所赋之值由三部分组成, 分别对应 R, G, B 三个单元, 因此, 拆除滤色片后, 原来的一个像素可以当成三个用。考虑原始黑白图像某一行上相邻的六个像素 $p_1 p_2 p_3 p_4 p_5 p_6$, 把它们的灰度分成前后两组 $g_1 g_2 g_3$ 和 $g_4 g_5 g_6$, 每组为一个完整的数据, 分别赋给 CLCTV 对应行上的相邻两个像素 $q_1 q_2$, 使得 $g_1 g_2 g_3$ 分别作用于 q_1 的 RGB, $g_4 g_5 g_6$ 分别作用于 q_2 的 RGB, 这样, 原来图像上六个像素的内容就在 CLCTV 上的两个像素上显示出来了。有的时候, 为保持 CLCTV 的完整性, 希望保留滤色片, 这时的编码方法与上述拆除滤色片时方法相同, 但要考虑不同滤色片对 He-Ne 激光的响应, 第二节的实验部分就是做的这个工作。如果在 He-Ne 激光下只有红分量起作用, 那么只能把原始图像上的每个像素逐一地搬到 CLCTV 的每个红单元上来显示。我们已经看到, 实际上绿、红分量能同时工作, 所以可以把原始图像的每两个像素编码显示在 CLCTV 一个像素的两个单元上, 只是其中多了一个按拟合关系从各个单元透射率求应赋之值的过程。从这个意义上说, 保持滤色片时我们可以得到两倍于纯红分量时的分辨率, 而拆除滤色片后可以得到三倍的分辨率。

4 小 结

本文对 CLCTV 在氦氖激光中的透射性质进行了分析, 通过实验, 我们看到, 在常用的适中亮度下, 三色分量的特性曲线与理论计算的结果符合得很好, R, G, B 之间也基本是相长的关系, 可以利用这一区域把计算机产生的图像基本不失真地在 LCTV 上显示出来。由于 CLCTV 的一个像素由三个单元组成, 在氦氖激光下如只使用一个红色, 便会造成其它两个单

元的浪费,从而引起分辨率下降。实验和分析表明,在不破坏器件结构的条件下可以让绿分量也发挥作用。蓝分量起作用的可能性比较小。无论是否拆除滤色片,利用本文提出的编码方法都可以得到优于纯红分量时的分辨率。

参 考 文 献

- 1 H. K. Liu, J. A. Davis, R. A. Lilly. Optical-data-properties of a liquid-crystal television spatial light modulator. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(12) : 635~ 637
- 2 U. Efron, S. T. Wu, T. D. Bates. Nematic liquid crystals for spatial light modulators: recent studies, *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(2) : 247~ 252
- 3 M. T. Anthony. Low-cost LCD spatial light modulator with high optical quality. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(9) : 1380~ 1382
- 4 T. S. Y. Francis, S. Jutamulia, X. L. Huang. Experimental application of low-cost liquid crystal TV to white-light optical signal processing. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(19) : 3324~ 3326
- 5 F. Mok, J. Diep, H. K. Liu *et al.*. Real-time computer-generated hologram by means of liquid-crystal television spatial light modulator. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(11) : 748~ 750
- 6 K. D. Hughes, S. K. Rogers, J. P. Mills *et al.*. Optical preprocessing using liquid crystal television. *Appl. Opt.*, 1987, **25**(6) : 1042~ 1044
- 7 B. S. Lowans, B. Bates, R. G. H. Greer *et al.*. Binary phase modulation properties of a programmable liquid-crystal television display. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(35) : 7393~ 7395
- 8 K. Lu, B. E. A. Saleh. Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(3) : 240~ 246

Study of Transmittance of a He-Ne beam through Color-liquid-crystal-television

Zhu Zimin Feng Hui Ruan Yu

(Department of Photoelectronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract Contributions of red, green and blue components of color-liquid-crystal-television to the transmittance of a He-Ne laser beam should be clarified. Experiments show that there is an approximate linearity in quite a large range for the red and green components. The green component is even more active than the red, but the blue is inferior. It is possible to reduce the loss of spatial resolution by virtue of the spectrum coincidence of the filters and the non-linearity of liquid crystal. It is also observed that the three color components have a strong dependence on each other. Only considering both lightness and interaction of the three components can bring about the best effect of color-liquid-crystal-television in a coherent beam.

Key words liquid crystal TV, patial light modulator, color