

# 液晶光阀实时假彩色编码的色度特性

何战 陈祯培

(四川大学物理系, 610064)

**提要:** 本文采用简化混合场效应模式, 详细推导了  $45^\circ$  扭曲液晶光阀的投影光光强的数学公式, 给出了各种液晶光阀取向时的假彩色色度曲线; 讨论了这种假彩色编码的色度特性, 提出了液晶光阀最佳取向的选择原则。并讨论了液晶光阀实时假彩色编码法的调色性和混色现象等。

**关键词:** 实时假彩色编码, 液晶光阀, 色度分析, 偏振干涉

## Chromaticity characteristics of real-time pseudo-color encoding using a LCLV

He Zhan, Chen Zhengpei

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract:** The mathematical formulas of the projection light intensity of a  $45^\circ$  twisted nematic liquid crystal light valve (LCLV) are derived in detail, based on a simplified hybrid field effect mode. With the formulas, we have shown chromaticity diagrams of the pseudo-color under various directions of LCLV. The chromaticity characteristics of this pseudo-coloring method is discussed, and the optimum rules of LCLV's directions are presented. Finally, the color adjustability and color confusion phenomenon in this pseudo-color encoding technique are analysed.

**Key words:** real-time pseudo-color encoding, LCLV, chromaticity analysis, polarization interference

最近有几篇文献报道了利用液晶器件实现光学假彩色编码<sup>[1,2]</sup>。由于这类假彩色化方法是实时的且灵活性好, 编码色丰富, 色饱和度高, 因此受到广泛的重视。我们在文献[3]中提出了一种简化混合场效应模式。

本文将根据简化混合场效应模式的原理, 给出投影光光强公式的详细数学推导。并据此讨论了液晶光阀假彩色编码的色度特性, 给出各种条件下的色度曲线, 讨论液晶光阀最佳取向的选择原则, 并分析该方法的调色性和混色现象等问题。

### 一、简化混合场效应模式

液晶由于其自身的性质和分子排列的差异能表现出多种电光效应。本文采用混合场效应

模式讨论光阀的电光特性<sup>[3]</sup>。简化混合场效应的基本思想是:不加电场时,液晶层以扭曲向列

效应为主;当加上电场后,液晶分子的倾角是液晶层上电压和分子的空间位置的函数,而液晶分子的扭曲角为理想分布——液晶分子的扭曲角与最接近的电极表面上的分子扭曲角一致。

图 1 是采用简化场效应模式的分析图。 $z=0$  平面是读出光的入射面, $z=d$  平面是电介质反射镜。定义液晶光阀的方向为  $z=0$  平面上液晶分子的长轴(光轴)方向。坐标的选择使液晶光阀的取向平行于  $y$  轴。对于  $45^\circ$  扭曲液晶光阀, $z=0$  到  $z=d/2$  平面内的液晶分子长轴均平行于  $y$  轴,而  $z=d/2$  到  $z=d$  平面内的分子长轴均向右扭转  $45^\circ$ 。液晶分子的倾角用  $\theta(v, z)$  表示, $v$  是液晶层上的电压。显然,液晶分子的倾角分布对称于  $z=d/2$  平面。

线偏振读出光从  $z=0$  平面垂直进入液晶层,经电介质反射镜反射后再一次通过液晶层。偏振调制的输出光经一检偏器后转化为强度调制。我们将整个偏振调制过程分为四段(I, II, III, IV)讨论。设读出线偏振光的振幅为  $E$ , 偏振方向与  $y$  轴的夹角是  $\varphi$ , 所以它在  $x, y$  轴上的投影分别为

$$\begin{cases} E_x = E \sin \varphi \\ E_y = E \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

由于 I 区中液晶的光轴在  $yo$  平面内,那么到达  $z=d/2$  平面时  $x, y$  轴上的分量可表示为<sup>[4,5]</sup>

$$\begin{cases} E_x^I = E \sin \varphi \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} n_o \frac{d}{2}\right) \\ E_y^I = E \cos \varphi \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{d/2} n_e(v, z) dz\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$n_e(v, z) = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta(v, z) + n_o^2 \cos^2 \theta(v, z)}} \quad (3)$$

$n_o, n_e$  是液晶的  $o, e$  光折射率, $\lambda$  是读出光的波长。

II 区中液晶分子的光轴均向右扭转  $45^\circ$ , 所以我们需要在此将  $E_x^I$  和  $E_y^I$  分解到 I 区中液晶分子的光轴  $NN'$  和垂直于  $NN'$  的方向上(如图 2(a)所示),即

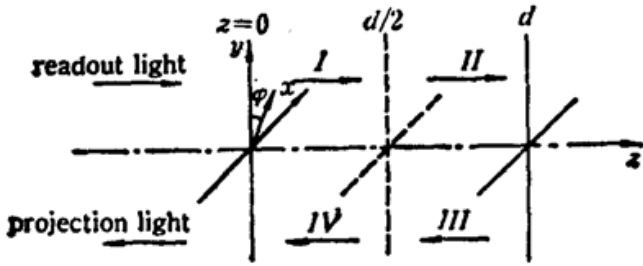


Fig. 1 An analytical model of the simplified hybrid field effect mode of LCLV

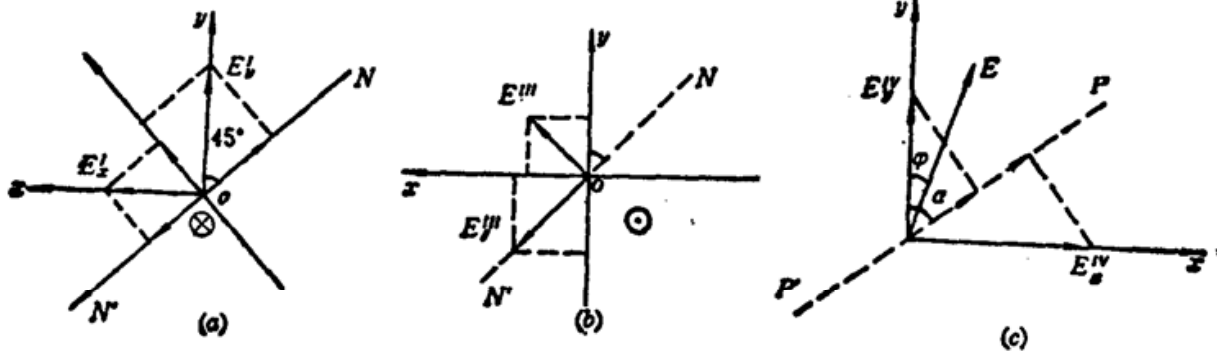


Fig.2

(a) Projection of polarized light; (b) Projection of polarized light; (c) Interference of polarized light

$$\begin{cases} E_I^I = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_x^I - E_y^I) \\ E_{\perp}^I = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_x^I + E_y^I) \end{cases} \quad (4)$$

这样到达  $z=d$  平面时, 上述两分量变为

$$\begin{cases} E_I^{II} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_x^I - E_y^I) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \int_{d/2}^d n_e(v, z) dz\right) \\ E_{\perp}^{II} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_x^I + E_y^I) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} n_o \frac{d}{2}\right) \end{cases} \quad (5)$$

经电介质镜反射, 两分量均附加  $\pi$  位相, 故可以不予考虑。再次经过该液晶层到达  $z=d/2$  平面时上述两分量为

$$\begin{cases} E_I^{III} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_x^I - E_y^I) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \int_{d/2}^d 2n_e(v, z) dz\right) \\ E_{\perp}^{III} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_x^I + E_y^I) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} n_o d\right) \end{cases} \quad (6)$$

在  $z=d/2$  平面处我们同样需要作一投影分解(如图 2(b)所示)。此时  $x, y$  轴上的分量为

$$\begin{cases} E_x^{III} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_{\perp}^{III} + E_I^{III}) \\ E_y^{III} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_{\perp}^{III} - E_I^{III}) \end{cases} \quad (7)$$

经第 IV 段后的  $x, y$  分量为

$$\begin{cases} E_x^{IV} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_{\perp}^{III} + E_I^{III}) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} n_o d\right) \\ E_y^{IV} = \frac{\sqrt{2}}{2} (E_{\perp}^{III} - E_I^{III}) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \int_0^{d/2} n_e(v, z) dz\right) \end{cases} \quad (8)$$

最后假设有一检偏器, 其透光方向  $PP'$  与  $y$  轴的夹角为  $\alpha$ , 如图 2(c)所示。透过检偏器的光波场为

$$E^0 = E_y^{IV} \cos \alpha + E_x^{IV} \sin \alpha \quad (9)$$

相应的输出光强:

$$I = E^0 (E^0)^* \quad (10)$$

考虑一种常见的情况: 检偏器的透光方向与输入线偏振光的偏振方向正交(即令  $\alpha = \frac{\pi}{2} + \varphi$ ), (10)式可化为

$$I = (E_y^{IV})^* (E_y^{IV}) \sin^2 \varphi + (E_x^{IV})^* (E_x^{IV}) \cos^2 \varphi - \{E_x^{IV} (E_y^{IV})^* + E_y^{IV} (E_x^{IV})^*\} \sin \varphi \cos \varphi \quad (11)$$

注意到液晶分子排列的对称性, 并将(2), (6), (8)式化入(11)式, 化简后可得出此时的投影光强:

$$\begin{aligned} I(v, \varphi, \lambda) = \frac{I_0}{4} \left\{ 2 - \frac{3}{2} \sin^2 2\varphi - 2 \cos^2 2\varphi \cos \frac{2\pi}{\lambda} [2\Delta(v)] \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin^2 2\varphi \cos \frac{2\pi}{\lambda} [4\Delta(v)] + 2 \sin 4\varphi \sin \frac{2\pi}{\lambda} [2\Delta(v)] \sin \frac{2\pi}{\lambda} \Delta(v) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $I_0 = E^2$  为读出光强。  $\Delta(v)$  定义为平均光程差

$$\Delta(v) = [\bar{n}_e(v) - n_0] \frac{d}{2}, \quad (13)$$

而

$$\bar{n}_e(v) = \frac{2}{d} \int_0^{d/2} n_e(v, z) dz. \quad (14)$$

由此可见, 投影光强除与落在液晶层上的电压  $v$  有关外, 还与液晶光阀的方向、读出光的波长有关。当一定强度的写入光照射到正常工作的液晶光阀的写入端时, 输出投影光的光强与读出光的波长有关。若采用白光光源作为读出光源, 投影光的颜色将与写入光的光强对应。这就是液晶光阀假彩色编码的基础。由于写入和读出过程都是实时的, 所以这是一种实时假彩色化方法。

## 二、色度分析

我们采用 CIE 1931 标准色度系统。将读出光源近似为  $\Delta$  光源, 由(12)式可得出这种假

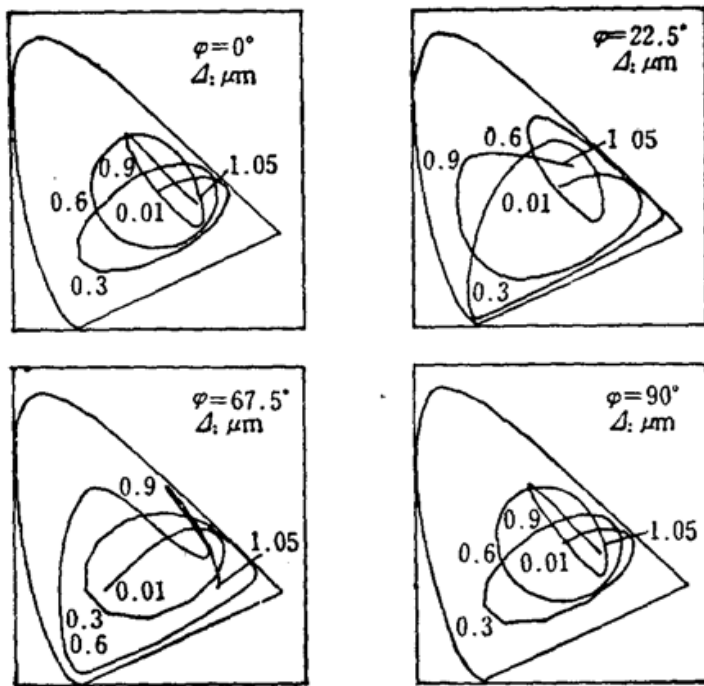


Fig. 3 The Chromaticity diagrams of the pseudo-color at various values of  $\varphi$

彩色编码法的色度曲线。图 3 中给出了  $\varphi = 0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $67.5^\circ$  和  $90^\circ$  时的色度曲线。平均光程差  $\Delta$  的取值范围为  $0.01 \sim 1.05 \mu\text{m}$  (因为液晶材料的典型折射率是  $n_e = 1.75$ ,  $n_o = 1.54$ , 液晶层厚度取为  $10 \mu\text{m}$ )。下面, 就其色度特性作几点讨论:

1. 液晶光阀假彩色编码的颜色是一种偏振干涉色。这种假彩色化方法的实质是白光偏振干涉, 它不同于以前的全息和衍射编码法, 是新的一类假彩色化方法。这种方法可实时调色, 光强利用率高, 色饱和度好, 色范围宽。与位相调制假彩色编码的零级色度曲线<sup>[3]</sup>相比, 适当选择的  $\varphi$  角可使编码色的范围更宽, 饱和度更好。

2. 液晶光阀的取向对假彩色编码结果影响很大。当  $\varphi = 0^\circ$  (采用实现非相干图

像到相干图像转换的系统)时, 假彩色的色度范围较小, 色饱和度在紫色端较差。随着  $\varphi$  角的增加, 编码色的色范围和饱和度均增大。当  $\varphi = 22.5^\circ$  时, 色范围达到极大, 色饱和度也很好, 出现了一些与光谱色相同或十分接近的颜色。当  $\varphi$  超过  $22.5^\circ$  后, 色度曲线变得复杂, 随平均光程差的变化加快, 色范围和饱和度稍有减小。当  $\varphi$  达到  $67.5^\circ$  时, 色范围和色饱和度再一次达到极大。之后, 色范围和色饱和度又逐渐减小, 直到  $\varphi = 90^\circ$ 。显然, 色度特性随  $\varphi$  角的变化以  $90^\circ$  为一个周期。实验结果已证明了这一点。

关于液晶光阀最佳取向的选取, 我们认为, 首先, 一般的非相干到相干图像转换系统对

假彩色编码来说不是最佳的。从色度范围的大小来看  $\varphi=22.5^\circ$  和  $\varphi=67.5^\circ$  (一个周期内) 时效果最佳, 但如果我们所需要区分的密度差较小时可适当选择其它  $\varphi$  角(如  $\varphi=30^\circ$ )。因此适当选择液晶光阀的方向可以使我们适应各种要求, 得到层次丰富、颜色鲜艳的编码图。

3. 液晶光阀假彩色编码是一种可实时调色的假彩色化方法。主要的调色因素有: (1) 驱动电源的输出电压。平均光程差  $\Delta$  与落在液晶层上的电压有关。改变驱动电源的电压, 落在液晶层上的电压  $v$  也发生相应变化, 从而引起颜色分布的改变; (2) 改变液晶光阀的取向; (3) 调节检偏器的透光方向。这是偏振干涉假彩色编码法的必然结果。(12)式只给出了起偏器和检偏器的透光方向正交时的结果。当它们的方向平行时, 输出的假彩色反转。除此之外, 调节写入光的平均光强等因素也可实时调色。

众多的调色因素大大增加了该编码法的灵活性, 使之可以适应各种图片、各种编码要求。此外这种调色是可重复的, 它使我们很容易比较各种编码结果, 从中选出最佳效果。

4. 混色现象是光学假彩色编码所不可避免的。这些同色异谱点很容易引起误判。由于这种假彩色化方法能实时地调色, 因此我们可以尽量寻找避免混色的区域。另外, 调色时同色异谱点很容易变成两个不同的颜色, 这有利于我们判断是否出现了混色现象, 避免误判。

5. 编码色的均匀性受到许多因素的影响。首先是液晶光阀的均匀性, 其中最主要的是液晶分子排列的均匀性, 因为它直接影响着对读出偏振光的偏振态的调制。其次是读出偏振光的平行性和垂直性。平行性是指读出光应当是准直平行的。垂直性是要求读出光垂直于液晶层入射。平行性和垂直性不佳势必使不同角度的读出光附加不同的光程差, 影响编码色的均匀性。

最后, 我们必须指出, 虽然简化混合场效应模式是一种近似模式, 但它能较好地反映编码的实际规律。另外, 由于这是一种静态模式, 因此没有反映电源频率对编码色的影响。事实上, 电源的频率变化也能影响输出编码色的分布。

### 参 考 文 献

- 1 F. T. S. Yu, *et al.*, *Opt. Laser Technol.*, **19** (1), 45 (1987)
- 2 Tien-Hsin Chao *et al.*, *Opt. Eng.*, **27** (5), 393 (1988)
- 3 何战, 陈祯培 *et al.*, *中国激光*, **18** (3), 217 (1991)
- 4 Susumu Saito, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **138**, 187 (1986)
- 5 王其祥, *工程光学原理* (江苏科技出版社, 1983), 518~534
- 6 龚谦 *et al.*, *光学学报*, **4** (8), 677 (1984)