

液晶光阀(LCLV)实时假彩色编码

何战 陈祯培 周英

(四川大学物理系, 610064)

提要: 本文利用液晶光阀实现了光学密度图像的实时假彩色编码。文章采用一种简化混合场效应模式, 数学地分析了液晶光阀对读出线偏振光的偏振态的调制作用, 给出了投影光束的光强与液晶层上的电压、读出光的偏振方向和波长的关系, 讨论了液晶光阀假彩色编码的原理和实质, 并得到了实际假彩色编码的结果。

关键词: 液晶光阀, 实时假彩色编码, 偏振调制

Real-time pseudo-color encoding using a liquid crystal light valve

He Zhan, Chen Zhenpei, Zhou Ying

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu)

Abstract: The principle and technique of real-time pseudo-color encoding for optical density images using a liquid crystal light valve(LCLV) are described and a simplified hybrid field effect mode of LCLV is presented, the polarized modulation of linear polarization readout light passed through liquid crystal layer is mathematically analysed, and the relations between the projection intensity and the voltage on the LC layer, the polarization direction and the wavelength of the readout light are given. With these results, the principle and essence are discussed in detail. Experiments show that our analysis method is effective. At last, some pseudo-coloring images are presented.

Key words: liquid crystal light valve, real-time pseudo-color encoding, polarized modulation

八十年代以来, 已有多种用光学手段实现黑白密度图像假彩色化的方法^[1~4], 这些方法大都需要对待处理图片进行预处理, 因而无法实现实时的假彩色编码和充分发挥光学运算速度快的优点。

液晶光阀是一种实时的空间光调制器, 它主要被用于实现非相干图像到相干图像的转换, 并已被广泛地应用于图像的处理、识别及显示等领域^[5~7]。本文利用液晶光阀对偏振光的偏振调制作用, 实现了密度图像的假彩色编码。由于这一器件的转换速度很快, 故可实现实时的假彩色编码。

一、原 理

1.1. 液晶光阀的结构和工作原理

液晶光阀主要分为两部分：由光导层和光阻膜组成的光敏层和由扭曲向列液晶和电介质镜组成的反射式光调制层。写入光投射在光阀的写入端。线偏振读出光由光阀的读出端进入液晶光阀，再经介质镜反射后由读出端出射，其偏振态的变化将由检偏器转化为光强变化。为了分析液晶光阀的工作原理，我们采用混合场效应模式。该模式的基本思想是：液晶层上加不加电场时，液晶层以扭曲向列效应为主，当加上电场后，液晶层以纯光学双折射效应为主^[6]。

液晶光阀上加不加电场时，液晶层中的液晶分子为螺旋状排列。分子的长轴彼此平行且与电极表面平行，相邻两层分子的长轴略有一点转向。对于 45° 扭曲液晶光阀，从液晶层前表面到后表面，液晶分子的长轴连续扭转 45° 。如果此时检偏器的透光方向与读出光的偏振方向垂直，由于液晶分子的扭曲向列效应，投影光束的光强为零。当液晶层上加上适当电场时，分子的排列规律将发生变化，原来平行于电极表面的分子开始倾斜，其倾角的大小与分子在液晶层中的位置和液晶层上的电压有关。同时，分子的扭曲角也发生变化(如图 2 所示)。此时两电极表面上的液晶分子的倾角保持为 0° ，但其扭曲角分别是 0° 和 45° 。电场的作用使分子的扭曲螺旋结构被压缩在液晶层中心附近。理想情况下，从 0 到 $d/2$ 内的液晶分子的扭曲角均为零；而 $d/2$ 到 d 内的液晶分子的扭曲角均为 45° 。这时由于读出光的偏振态受到液晶分子的双折射效应的影响，所以投影光强与液晶层上的电压有关。当一定强度的写入光入射到光阀的写入端时，引起液晶层上的电压变化，投影光强也相应变化，从而实现图像的转换。

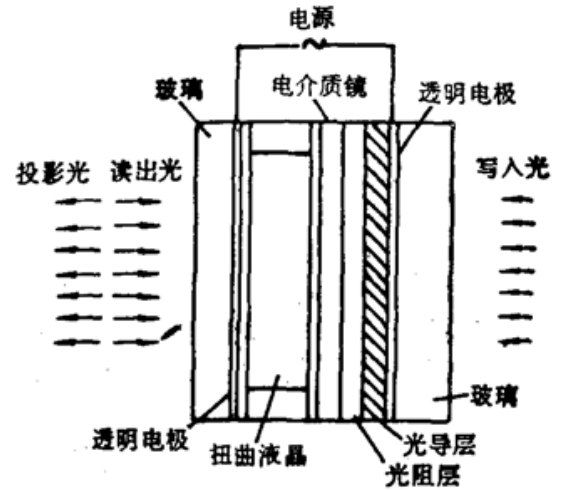


图 1 液晶光阀的结构简图

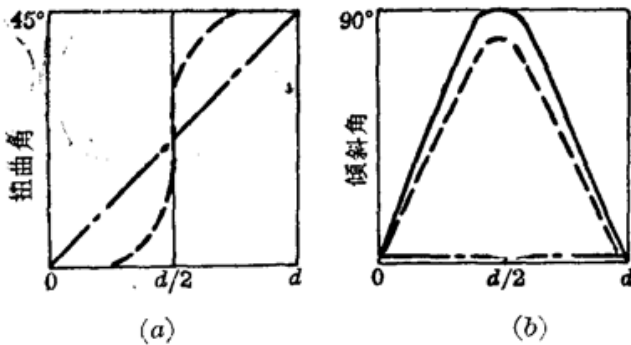


图 2 液晶层中分子取向与其空间位置的关系
 (a) 扭曲角； (b) 倾角。---无电场；
 ——有电场； ——理想

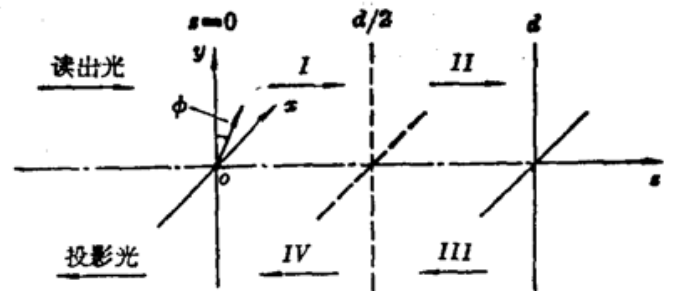


图 3 液晶光阀的简化混合场效应模式分析图

1.2. 简化混合场效应模式及数学分析

为了能用数学方法分析液晶分子的双折射对读出光的影响，我们采用一种简化混合场效应模式，即加电场时假设液晶分子的扭曲角为理想分布，而液晶分子的倾角分布是液晶层上电压的函数。事实上，大多数实际情况中液晶分子的排布都接近于这种分布。因为分子间的扭曲排列受分子长程力决定，随着分子倾角增加，长程力减弱。当某层分子取向与电极表面垂直时，长程扭曲力为零，所以螺旋结构被切断，所有分子的扭曲方向与最近的电极表面分子取向一致。因此可以把该液晶层看成是两个同向扭转排列部分之和。

图 3 是简化场效应模式的分析图。平面 $z=0$ 为读出光的入射面， $z=d$ 为电介质反射镜，

它们之间是液晶层。此处讨论的是 45° 扭曲(向右)液晶光阀,坐标的选择使 $z=0$ 平面上的液晶分子取向平行于 y 轴,因此从 $d/2$ 到 d 内的分子取向均向右转 45° 。液晶分子的倾角用 $\theta(v, z)$ 表示, v 是液晶层上的电压。

读出线偏振光从 $z=0$ 平面垂直进入液晶层,经电介质镜反射后再一次通过液晶层。偏振调制的输出光经检偏器后转化为光强调制。根据前面的假设,我们可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 轴成 ϕ 角,它在 x 、 y 轴上的投影为

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

由于 I 区中液晶的光轴在 yoz 平面内^[8],根据偏振光的传播规律,在 $z = \frac{d}{2}$ 平面处 x , y 分量可表示为

$$\begin{cases} E'_x = E \sin \phi \\ E'_y = E \cos \phi \exp j \frac{2\pi}{\lambda} \Delta(v) \end{cases} \quad (2)$$

其中 v 是液晶层上的电压, λ 是读出光波的波长。定义平均光程差:

$$\Delta(v) = [\bar{n}_e(v) - n_0] \frac{d}{2}, \quad (3)$$

这里

$$\bar{n}_e(v) = \frac{2}{d} \int_0^{d/2} \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta(v, z) + n_o^2 \cos^2 \theta(v, z)}} dz \quad (4)$$

将分量 E'_x 和 E'_y 向 II 区中液晶的光轴方向和与之垂直的方向投影。然后根据前面的传播规律,可得到 $z=d$ 平面处的电场分量。与前面的分析相似还可求出经过 III 和 IV 后电场分量,经适当简化运算后,即可求出检偏器的透光方向与读出线偏振光的偏振方向正交时投影光束的光强为

$$\begin{aligned} I(v, \phi, \lambda) = \frac{E^2}{4} \left\{ 2 - \frac{3}{2} \sin^2 2\phi - 2 \cos^2 2\phi \cos \frac{2\pi}{\lambda} [2\Delta(v)] \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \sin^2 2\phi \cos \frac{2\pi}{\lambda} [4\Delta(v)] + 2 \sin 4\phi \sin \frac{2\pi}{\lambda} [2\Delta(v)] \sin \frac{2\pi}{\lambda} \Delta(v) \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

由此可见,投影光束的光强 I 与液晶层上的电压、读出光波的波长和其偏振方向有关。

1.3. 液晶光阀实时假彩色编码的原理

液晶层上的电压 v 受两个因素的影响,一是电源所提供的电压,二是写入光强。当电源电压固定在适当值时,写入光使光导层的阻抗减小,落在液晶层上的电压升高,从而改变平均光程差 $\Delta(v)$ 。如果读出光是白光且偏振角 ϕ 固定,那么不同的写入光强将造成不同的投影光光谱分布 $I(\lambda)$ 。根据颜色合成原理,不同的写入光强将与不同的颜色相对应。若我们将密度图像直接成像到液晶光阀的写入端,那么不同的密度将与不同的颜色相对应,即实现图像密度的假彩色编码。

由于液晶光阀是一种实时的图像转换器件,这样的假彩色编码又无须对待处理图像作任何预处理,因此这是一种实时的光学假彩色编码。此外,改变电源的电压、读出偏振光的偏振

方向、写入光的平均光强等都能实时地改变输出的颜色分布。因此液晶光阀假彩色编码又是一种实时的可调色假彩色编码方法。

由前面的讨论可知，这种假彩色编码的实质是一种偏振干涉假彩色编码。它是利用电场下液晶分子对偏振光的偏振态的调制作用以及偏振干涉的显色性实现的。

二、实验过程及结果

2.1 理论验证

图4是液晶光阀实时假彩色编码的实验装置图。 P_2 是液晶光阀。待处理的图像经透镜 L_1 成像到液晶光阀的写入端。白光光源 S 发出的光经透镜 L_2 和 L_3 后成为准直平行光。 P_3 和 P_5 是一对正交起偏/检偏器， P_4 是半反半透镜。输出的假彩色编码图位于 P_6 平面上。

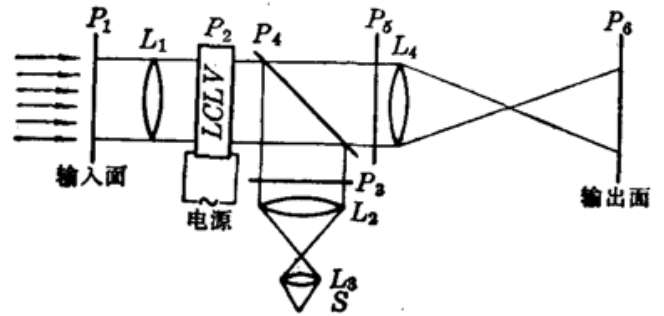


图4 液晶光阀实时假彩色编码系统

为了检验简化场效应模式的有效性，我们在 P_6 平面上放置一个光电探测器，在波长分别为 $0.645\mu\text{m}$ 、 $0.526\mu\text{m}$ 和 $0.452\mu\text{m}$ 的三基色光读出时，测量了读出光的透过率 $T=I/E^2$ 与角度 ϕ 的关系。图5(a)是实验结果。此时电源电压 $V=3.56\text{V}$ ，频率 $f=100\text{Hz}$ ，写入光光强 210Lx 。图5(b)是平均光程差 $\Delta=0.7\mu\text{m}$ 时相应于上述三波长的理论曲线。比较可见，实验曲线和理论曲线基本吻合。其周期都是 $\pi/2$ ，三基色光的光强关系也是一致的。证明了这种分析方法是可行的。

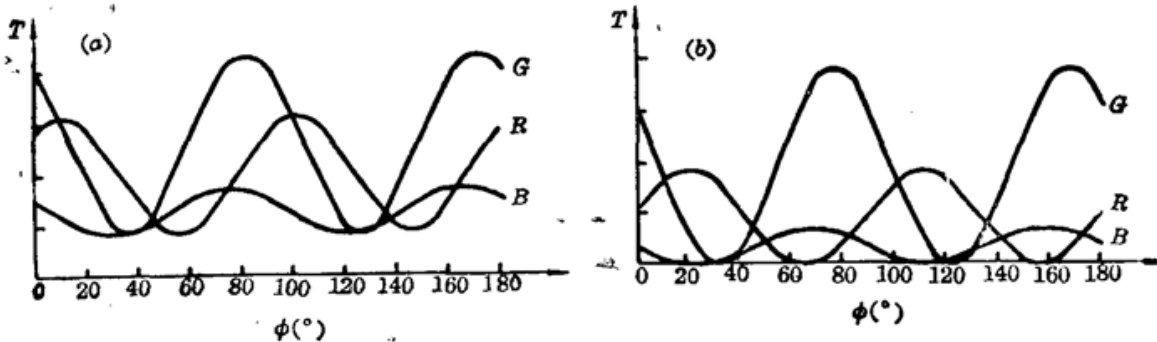


图5 三基色的 $T-\phi$ 曲线
(a) 实验结果; (b) 理论曲线

2.2 实验结果

我们用 45° 扭曲液晶光阀建立了一个有一定实用价值的液晶光阀实时假彩色编码系统。其主要性能参数如下：液晶光阀的直径为 100mm ，系统分辨率大于 40pl/mm ，延迟时间不超过 100ms ；电源电压 $0\sim 5\text{V}$ ，频率 $0\sim 10\text{MHz}$ 。

图6是某热电厂冷却水池的热红外黑白片。图中的密度大小反映了冷却水排入水池后的温度分布，最大温差为 7°C 。得到的实时假彩色编码图(电源电压 3V ，频率 900Hz ，偏振角为 30°)表明，假彩色编码图至少有7个色调，可细致直观地反映不同地方的温度变化，明显的轮廓线是等温区界线的反映。

由实验结果可知,这种方法得到的假彩色颜色丰富,饱和度好,层次清晰。影响编码效果的因素很多,主要因素是电源电压和偏振角 ϕ 。而且角度 ϕ 的选择直接影响编码色的范围、饱和度等。由于这是一种实时的假彩色编码,因而使我们有可能实现对运动图像的假彩色编码。

作者在此特向南京 28 所液晶组的同志表示感谢。

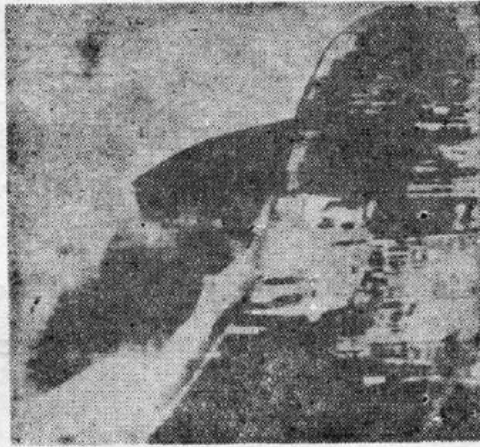


图 6 航空热红外黑白片的假彩色编码图像

参 考 文 献

- 1 F. T. S. Yu, A. Tai *et al.*, *J. Opt.*, **9**, 269(1978)
- 2 H. K. Liu, J. W. Goodman, *SPIE*, **83**, 125(1976)
- 3 T. H. Chao, S. L. Zhuang *et al.*, *Opt. Lett.*, **5**(6), 230(1980)
- 4 郭履荣,陈祯培 *et al.*, *光学学报*, **4**(2), 145(1984)
- 5 J. Grinberg *et al.*, *Opt. Eng.*, **14**(3), 217(1975)
- 6 W. P. Bleha *et a.*, *Opt. Eng.*, **17**(4), 371(1978)
- 7 J. Grinberg *et al.*, *IEEE Trans. on Electron Devices*, **22**(9), 775(1975)
- 8 Susumn Saito, *Mol. Cryst. Liqq. Cryst.*, **138**, 187(1986)

广 告

山东中晶光电子公司

本公司是山东大学和中国科学器材进出口总公司合资合办的人工晶体实业公司,独家销售山东大学所生产的各种晶体以及本公司生产的晶体和制作的各种器件(KTP、KDP、DKDP、ADP、NYAB、SBN、TGS、LAP、LT、KN等以及用这些晶体制作的倍频器、三倍频器、四倍频器、Q开关等)。

中晶旨在与广大客户共同发展,愿为您提供技术服务和销售服务。愿与各位同仁进行各种方式的合作并免费提供有关资料。中晶将以积极、竭诚的精神为您获得成果奉献服务。

地址: 山东大学晶体所内
电话: 0531-616404
联系人: 祁建平

邮码: 250100
传真: 0531-616404