

303-308

# 垂直定向液晶光阀及光电特性的研究

陈杰 朱振才

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

顾培夫 唐晋发

(浙江大学光电与科仪系, 杭州, 310027)

TN141.9

**A** **摘要** 系统地讨论了排列相畸变模式液晶光阀的结构、原理和制作, 结合实际测试对其等效电路和电学匹配进行了分析, 详细讨论了它的光电特性及相互关系. 实测的液晶垂直排列方式工作的液晶光阀性能指标为: 分辨率大于 50lp/mm, 白光输入灵敏度为  $6.77\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 响应时间为 200ms/300ms, 白光输出对比度为 200:1.

**关键词** 垂直定向, 液晶光阀, 排列相畸变.

## 引言

(12)

液晶光阀(LCLV)已广泛地应用于实时大屏幕投影显示、光信息处理、光计算和神经网络、自动目标识别和可见-红外转换等领域<sup>[1-3]</sup>.

光寻址液晶光阀(反射式)的典型结构<sup>[4]</sup>, 主要是由夹在两块镀有透明电极的基板之间的光导层、液晶层、光阻隔层和介质反射镜等多层膜组成, 其工作原理是基于光导层的光电效应和液晶层的电光效应. 当两透明电极间施加交流电压, 光导层各点接收光强不同的输入图像时, 光导层上各点的阻抗随光强产生相应的变化, 改变了液晶层上对应各点的电压, 使液晶分子的排列产生不同的变化, 改变了读出光的偏振态, 实现了对读出光的调制. 美国休斯公司最早开发的 CdS 液晶光阀是用 CdS 薄膜作光导层, 向列型液晶作光调制材料. 这种 CdS 液晶光阀具有较高的输出对比度和空间分辨率, 但由于采用扭曲向列模式, 暗态时利用的是液晶的扭曲向列效应, 因而暗态不是很好, 对比度提高有限, 而且 CdS 的光谱响应呈尖峰状(峰值波长为 510nm), 因此, 白光输出对比度低.

我们研制的液晶光阀采用负性液晶垂直排列相畸变工作模式, 获得了好的暗态, 提高了液晶光阀的白光输出对比度. 由于液晶输出特性随电压变化快, 降低了对光导层光电导变化的要求. 本文着重介绍了这种液晶光阀的结构和制作, 进行了等效电路和电学匹配的分析, 测试并讨论了器件的主要光电特性及其相互关系.

## 1 液晶光阀的电路模型及分析

液晶光阀由夹在两个透明导电电极之间的液晶层、介质高反膜、光阻隔层和光导层组成. 从电学特性的角度来看, 这些组分都可以相应地看作电阻和电容的组合. 由于液晶分子

的各向异性,液晶层的电阻和电容都与液晶分子长轴对电极表面倾角有关,即同液晶上所加电压有关(液晶分子取向由外加电压决定),所以液晶层可等效成与液晶层上电压有关的可变电阻和可变电容的并联.介质高反膜由于其电阻相当大,可认为是一个纯电容,不随电压而变化.另外,光导层与光阻隔层之间存在从光阻隔层指向光导层的异质结.随着写入光强度的变化,光导层的电阻和光导层光阻隔层间异质结的结电容都将随之改变,所以应将光导层与光阻隔层等效成二极管、可变电容与可变电阻的组合.因此整个光阀的等效电路如图1(a)所示,图中 $C_1$ 、 $R_1$ 对应于液晶层的电容和电阻, $C_2$ 为介质高反膜的电容, $R_3$ 、 $(R_3+R_4)$ 和 $C_3$ 分别是光导层与光阻隔层所形成的异质结的正向电阻、反向电阻和电容.

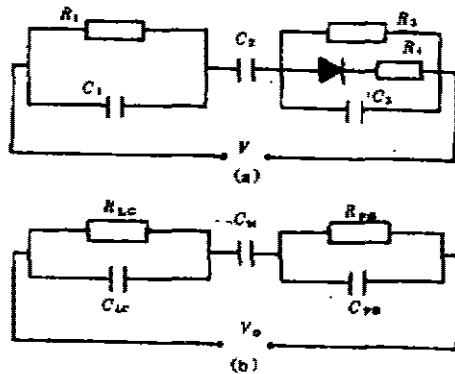


图1 液晶光阀等效电路  
Fig.1 Equivalent circuit of LCLV

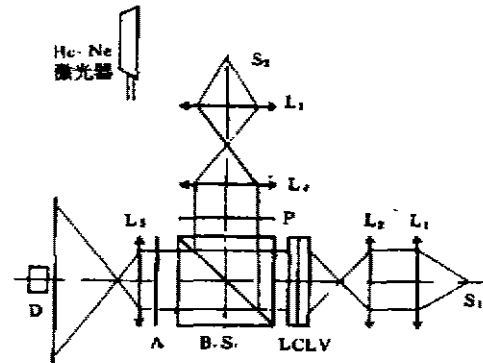


图2 液晶光阀性能测试系统原理图  
Fig.2 Schematic diagram of the measurement system of LCLV

为便于分析,可对图1(a)所示的液晶光阀等效电路作进一步简化.由于光导层与光阻隔层之间的正反向阻抗相差很小,所以略去等效电路中的二极管,得到液晶光阀的简化等效电路,如图1(b)所示.图中 $C_{LC}$ 、 $R_{LC}$ 对应于液晶层的电容、电阻, $C_M$ 为介质高反膜的电容, $C_{PC}$ 、 $R_{PC}$ 分别对应于光导层和光阻隔层组合的电容和电阻, $V_0$ 是加在液晶光阀器件上的交流电压.由简化等效电路可知,液晶层压降 $V_{LC}$ 可表示为

$$V_{LC} = \frac{|(1/R_{LC} + j\omega C_{LC})^{-1}|}{|(1/R_{LC} + j\omega C_{LC})^{-1} + (j\omega C_M)^{-1} + (1/R_{PC} + j\omega C_{PC})^{-1}|} \cdot V_0, \quad (1)$$

其中 $\omega$ 为电源频率.

由于液晶光阀的输出对比度实际上是由液晶层上的电压转移来决定的,因而我们考察亮态时液晶层压降与暗态时液晶层压降之比,即电压转移率 $\gamma$ ,有

$$\gamma = \frac{|1/R_{LCd} + j\omega C_{LCd}| |(1/R_{LCd} + j\omega C_{LCd})^{-1} + (j\omega C_M)^{-1} + (1/R_{PCd} + j\omega C_{PCd})^{-1}|}{|1/R_{LCi} + j\omega C_{LCi}| |(1/R_{LCi} + j\omega C_{LCi})^{-1} + (1/\omega C_M)^{-1} + (1/R_{PCi} + j\omega C_{PCi})^{-1}|}, \quad (2)$$

其中 $R_{LCd}$ 、 $R_{LCi}$ 、 $C_{LCd}$ 、 $C_{LCi}$ 分别为液晶层暗亮态时的电阻、电容, $R_{PCd}$ 、 $R_{PCi}$ 、 $C_{PCd}$ 、 $C_{PCi}$ 分别为光导层暗亮态时的电阻、电容.由式(2)可知,当 $\omega \rightarrow 0$ 时, $\gamma \rightarrow R_{LCi}/R_{LCd} \rightarrow 1$ ,即当电源频率很低时,液晶层上的电压转移率取决于液晶本身的阻抗;当 $\omega \rightarrow \infty$ 时, $\gamma \rightarrow C_{PCi}/C_{PCd} \rightarrow 1$ ,即当电源

频率很高时,光阀的工作特性完全由光导层容抗所决定.由此可知,液晶光阀既不能在直流状态下工作,也不能在太高的频率下工作,对一个具体的光阀而言,都存在一个最佳工作点,对上式(2)求导,可得出最佳角频率 $\omega$ .

通过对负性液晶 ZLI-4788 的阻抗和容抗测量可知,即使电源频率为 1kHz,液晶的阻抗也在容抗的 10 倍以上,所以液晶的电抗基本上由液晶层的容抗决定.通过对光导层与光阻隔层的阻抗、容抗测量可知,在 1kHz 下阻抗远小于容抗,所以式(2)可简化为

$$\gamma = \frac{C_{Lca}}{C_{Lcl}} \frac{|-j/\omega C_{Lca} - j/\omega C_M + R_{Pca}|}{|-j/\omega C_{Lcl} - j/\omega C_M + R_{Pcl}|} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,提高电压转移率主要途径一是提高  $C_{Lca}/C_{Lcl}$ ,二是提高  $R_{Pca}/R_{Pcl}$ .

对于扭曲向列模式的液晶光阀,由于采用正性液晶, $\epsilon_{\parallel} > \epsilon_{\perp}$ ,即  $C_{Lca} < C_{Lcl}$ ,减弱了由光导层引起的电压转移率,这对提高输出对比度是十分不利的,特别是两者相差很大时,造成了对光导层  $R_{Pca}/R_{Pcl}$  的高要求.若采用排列相畸变工作模式,由于负性液晶  $\epsilon_{\parallel} < \epsilon_{\perp}$ , $C_{Lca} > C_{Lcl}$ ,从而提高了电压转移率,降低了对光导层的要求.由此可知,由于负性液晶提高了电压转移率,排列相畸变工作模式的液晶光阀对光导层的要求不再是很大的亮暗光电导变化,而是较大的动态范围以提高图像的灰度等级,从这一点上来讲,光导层的亮电阻不应太小,以保证亮态时液晶层上的电压不远大于其饱和电压.

## 2 器件制作及特性测试

实际制作的液晶光阀采用掺杂的 CdS-CdSe 薄膜作为光导层,光调制材料采用 Merck 公司生产的 ZLI-4788[000]向列型负性液晶.先分别在玻璃或光纤面板基片上用电子束蒸发方法淀积一层厚度为 100~200nm 的 ITO 透明导电膜,面电阻约为 30~50 $\Omega/\square$ ,然后再依次淀积光导层(CdS-CdSe)、光阻隔层(CdTe)和介质反射镜(7~9 层 ZnS/MgF<sub>2</sub>).CdS-CdSe 光导层采用钼舟加热蒸发,蒸发速率为 1.0~3.0nm/s,厚度为 3~7 $\mu\text{m}$ ,其光电导效率随掺杂比例、基底温度而变化.

排列相畸变模式液晶光阀采用负性液晶,液晶分子长轴垂直于基片表面排列.垂直定向层采用 SiO<sub>2</sub> 膜层经长链烷基醇与长链烷基胺混和液高温处理获得.实际采用十八烷基醇和十八烷基胺的混和液高温处理 SiO<sub>2</sub> 表面,由于长链醇分子与 SiO<sub>2</sub> 形成化学键而垂直于基片排列,从而使液晶分子垂直于基片定向.定向效果与混和液浓度、处理温度和处理时间有关<sup>[5]</sup>.液晶层的厚度为 6~10 $\mu\text{m}$ ,光阀的有效尺寸为  $\Phi 48\text{mm}$ .为了使液晶分子倾斜时方向一致,实际定向时使液晶分子具有预倾角,其大约为 5~10°.

液晶光阀的测试参数包括液晶的工作特性、光阀的写入灵敏度阈值、输出对比度、响应时间和空间分辨率等.测试光路如图 2 所示.采用大功率卤钨灯以提高测量精度,采用高亮度投影光束以提高信噪比.测试光阀可见光工作特性时,在写入光路和读出光路中使用隔热片,避免了红外辐射对光阀的影响.偏振分光棱镜作为分束镜和起检偏器.

### 2.1 液晶输出特性

无写入光时,液晶光阀输出光强随电压的变化反映了液晶层的工作特性.采用白光光源测试,改变光阀的工作角度和电压频率,测试输出光强与电压的关系,结果如图 3 所示.由图

可知,工作角度(液晶分子倾斜方位与起偏器透光轴之间夹角)为  $45^\circ$  时光阀的输出对比度最大(为 500)。随着频率的增加,曲线左移,这表明随频率增加,容抗所占比重增大,因而液晶层上分压增大。

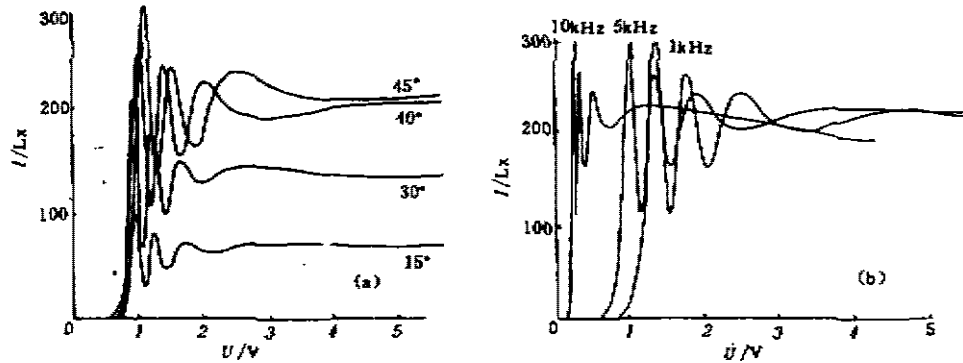


图3 (a)不同角度和(b)不同频率下液晶光阀的输出光强度与电压的关系(无光照)  
Fig. 3 Output density of LCLV as a function of the voltage for different angle and different frequency (without illumination)

图4表示不同波长的输出光强随电压变化曲线。由图可知,第一个峰值电压相差很小,说明这时的色散相对较小。

## 2.2 写入灵敏度阈值

液晶光阀的写入灵敏度主要取决于光导层的光电导特性,与液晶光阀的工作点亦有关系。读出光采用 He-Ne 激光,写入光为白光,用照度计标定写入面的照度,标定系数为 2.0,用探测器探测读出光强度。无写入光时,取驱动电源频率为  $1\text{kHz}$ ,工作电压为  $1\text{V}$  时光阀处于暗态,探测器测得暗态光电流为  $0.004 \times 10^{-7}\text{A}$ ,改变写入光照度使暗态光电流 D1 读数上升至  $0.006 \times 10^{-7}\text{A}$  时, D2 读数为  $6.1\text{Lx}$ ,因此写入灵敏度阈值为  $6.1 \times 2 = 12.2\text{Lx} = 6.77\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

## 2.3 输入输出特性

液晶光阀的输出对比度主要取决于液晶的定向效果、光导层的暗电导及亮暗电导比,其次还与驱动电源的频率、电压及读出光的强度有关。用照度计来测试不同电源频率和不同光导层时输出光强随输入光强的变化,结果如图5所示,其中  $I_r$ 、 $I_w$  分别为读出、写入光强。由图可知,该液晶光阀的输入输出特性存在一个最佳频率  $f=1\text{kHz}$ ,此时对比度最高为 200,这与液晶层的输出特性和电压之间的关系曲线随频率变化的趋势不同,其原因在于光导层存

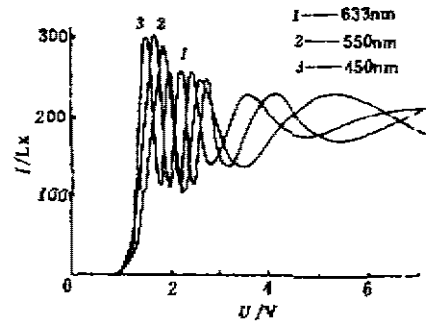


图4 不同波长下液晶光阀的输出光强与电压的关系(无光照)  
Fig. 4 Output density of LCLV for different wavelength as a function of the voltage (without illumination)

在一个最佳工作频率.

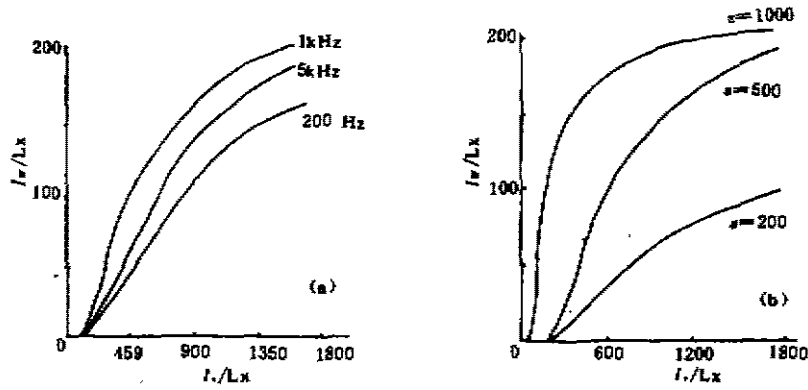


图5 不同电源频率、不同光导层的液晶光阀白光输入输出特性  
 Fig. 5 Input-output characteristic of LCLV for different power supply frequency and different photosensor

#### 2.4 响应时间

液晶光阀的响应时间取决于光导层和液晶层中响应慢的一个. 光导层的响应速度与测试时的写入光强有关, 还与工作频率和工作电压有关. 液晶的响应速度则与液晶的粘滞系数、厚度、各向异性值、弹性系数、驱动电压及定向层的预倾角有关. 在测试装置中, 用斩波器对写入光进行调制, 驱动电源频率为 1kHz, 电压为 1V, 测得上升时间为 200ms, 下降时间为 300ms, 相对于扭曲向列效应的光阀 (10ms/20ms) 来说响应速度较慢, 这是由于采用的负性液晶粘滞系数大的缘故.

#### 2.5 极限分辨率

液晶光阀的极限空间分辨率主要取决于光导层与光阻隔层界面的弥散. 写入光和读出光均为白光, 2号鉴别率板以 1:1 成像于光阀, 输出图像用读数显微镜观察, 以人眼的极限分辨为判据, 能观察到的输出条纹数大于 13, 所以得到液晶光阀的极限分辨率优于 50lp/mm.

### 3 结语

在对光寻址液晶光阀的结构和实际等效电路及电学特性分析的基础上, 采用排列相畸变工作模式, 研制了高对比的液晶光阀, 并对这种器件的光电特性及其相互影响作了测试、分析和讨论. 结果表明, 采用排列相畸变工作模式降低了光阀的暗态, 提高了电压转移率, 从而使液晶光阀的白光输出对比度能够得到很大的提高. 实测的液晶垂直排列方式工作的液晶光阀达到的性能指标为: 分辨率大于 50lp/mm, 白光输入灵敏度为  $6.77\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 响应时间为 200ms/300ms, 白光输出对比度为 200:1.

## 参考文献

- 1 Bleha W P. *Laser Focus/Electro-optics*, 1983, 19:111
- 2 Eiron U, et al. *J. Appl. Phys.*, 1984, 57:1356
- 3 Loda J, et al. *Proc. SPIE*, 1987, 760:78
- 4 Paul R Ashled, et al. *Appl. Opt.*, 1987, 26:241
- 5 陈杰,等. *光电子技术*, 1992, 12:211

## STUDY OF THE VERTICALLY ALIGNED LIQUID CRYSTAL LIGHT VALVE AND ITS PHOTOELECTRIC PERFORMANCE

Chen Jie Zhu Zhencai

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Gu Peifu Tang Jinfa

(*Department of Optoelectronics and Science Instrument, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China*)

**Abstract** The liquid crystal light valve with deformation of vertical alignment phase mode was introduced and the basic operating principle, structure and manufacturing were described. The equivalent circuit and electrical matching were analyzed in combination of the practical measurements. The photoelectric performance and the mutuality were discussed in detail. The performances for the typical devices are as follows: resolution 50lp/mm, input sensitivity in white  $6.77\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , response time 200ms(on)/300ms(off), contrast in white 200:1.

**Key words** vertical alignment, liquid crystal light valve, deformation of alignment phase mode.