

## 【其他研究】

## a-Si:H/FLC 光寻址液晶光阀性能研究

王江涛,陈向宁

(装备指挥技术学院 光电装备系,北京 101416)

**摘要:**通过对光寻址液晶光阀关键膜层的理论分析,提出了一种高性能的 a-Si:H/FLC 光寻址液晶光阀的等效电路模型,分析了光寻址液晶光阀的性能影响因素。这为研究空间分辨率高、响应速度快、光灵敏度好的光寻址液晶光阀打好了基础。

**关键词:**光寻址液晶光阀;关键膜层;等效电路模型

**中图分类号:** O436; TN141.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0707(2011)03-0127-03

光寻址液晶光阀(optical addressed liquid crystal light valve, OA-LCLV)作为一种典型的空问光调制器,其基本功能包括光信息放大、相干性能转换、波长变换(可视化)及偏振转换等,具有开关速度快、功耗低、分辨率高、孔径大和价格低等特点,已在光信息处理、大屏幕投影显示、光学相关器等商业、军事领域得到了广泛应用。

光寻址液晶光阀是一种能直接接收低强度可见光图像,并用来自另一光源的光实时地将这种图像转换成输出图像的图像传感器。他可以实现光-光转换,而且其内部的膜层结构可以将面积做得很大。影响光寻址液晶光阀性能的主要因素是其关键膜层的特性,因此对其关键膜层的选取和对光寻址液晶光阀性能影响因素的研究具有重要的实际意义。

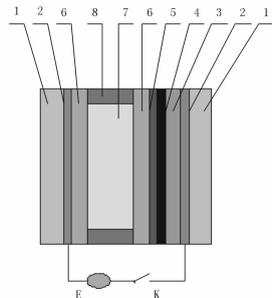
## 1 光寻址液晶光阀

### 1.1 结构及工作原理

光寻址液晶光阀采用的是一种“三明治”多层膜结构,由夹在2片ITO透明电极之间的光电导层、液晶层、光阻隔层、介质反射镜和液晶定向层等一系列薄膜层组成。光寻址液晶光阀的工作模式有反射模式和透射模式2种,本文中采用的是反射模式,其典型结构如图1所示。

光寻址液晶光阀在一定的交变电压下工作,其液晶分子在外电场作用下能够沿外电场的方向改变取向。当没有光照时,由于光电导层的阻抗较大,大部分电压落在光电导层上,而在液晶层上只有小部分的电压,对液晶分子的影响很小,故此时液晶层的调制作用很小;当有光照射到光电导层上时,光电导层的阻抗会迅速减小,从而使光电导层上的电压减小,在液晶层上分得的电压随之增大,其增量的大小由入射光的强度决定,此时液晶层的调制作用就会增大。这里,光电导层起着摄像与控制液晶层电压的作用。当不同强度的光照射到光电导层时,光电导层的电阻变化也不同,从

而使其在液晶层上形成的电压降也不同。光强大的区域阻抗小,在液晶层上所对应的电压降就大,因而一幅图像将在液晶层上形成一幅电压潜像,通过检偏系统可实现光电导层响应输入的光图像,并最终在光探测器处以图像形式得到输入图像的强度灰度等信息。



1.玻璃基片; 2.透明电极; 3.光电导层; 4.光阻隔层; 5.介质反射膜; 6.定向层; 7.液晶层; 8.衬垫; E.交流电源; K.开关

图1 光寻址液晶光阀的典型结构

### 1.2 发展和应用

目前国际上对液晶光阀的研究已经从光寻址转向电寻址,但在一些特殊的场合,光寻址液晶光阀仍然发挥着重要作用。在技术领域,国内外研究的重点主要包括关键膜层的特性,各膜层之间的匹配,等效模型的建立及仿真,制备工艺的改进以及光阀的频率特性、电光特性和输入输出特性等方面,其研究目的是为了提髙光寻址液晶光阀的性能,满足实际需要。

在应用领域,光寻址液晶光阀已经从传统的投影显示、光信息处理、波面实时转换等逐步转向更多领域,比如应用在防炫目眼镜、电焊帽等日常生活方面,环保节能方面,甚至应用于光学成像等方面。对光寻址液晶光阀的研究范围也从以前的可见光波段向红外、紫外波段扩展。

收稿日期:2010-12-23

作者简介:王江涛(1985—),男,硕士研究生,主要从事全光转换研究;

陈向宁(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学遥感及成像研究。

## 2 关键膜层的研究

### 2.1 光电导层

自 20 世纪 70 年代出现液晶光阀以来,人们一直在为提高液晶光阀的性能而不断地进行探索和研究。最初的液晶光阀采用 CdS 作为光敏感材料,后来人们对 C-Si、BSO、GaAs、a-Si:H 等光敏材料进行了一系列的研究<sup>[1]</sup>,发现 a-Si:H 做光电导材料具有特殊的优越性。

由于非晶硅半导体不具有长程有序性,电子跃迁过程中不再受动量守恒定则限制,因此可以更有效地吸收光子。图 2 表示太阳光谱可见光区非晶硅与单晶硅的吸收曲线<sup>[2]</sup>。一般在太阳光谱可见光波长范围内,非晶硅的吸收系数比晶体硅要大将近 1 个量级,其本征吸收系数高达  $10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,而且 a-Si:H 的禁带宽度  $E_g$  在 1.6 ~ 1.8 eV 之间。由于到达地球表面的大部分太阳光在可见光谱内,能量在 1.8 ~ 3 eV 之间,因此非晶硅光谱响应的峰值与太阳光谱峰值更接近,可以使太阳光波长小于 0.8  $\mu\text{m}$  的辐射大部分在 1  $\mu\text{m}$  薄层内被吸收。

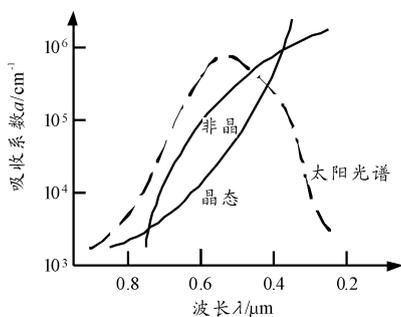


图 2 太阳光谱可见光区非晶硅吸收曲线

一般所说的非晶硅,均指含氢的非晶硅,或称氢化非晶硅(a-Si:H)。氢化非晶硅材料存在大量的 H,饱和了硅中的悬挂键,使 a-Si 光电性能得到极大改善,另外其沉积的温度较低,在保证均匀性的薄膜情况下有较好的空间分辨率、较高的亮暗电导比和快速的响应时间,而且他可在整个可见光区和近红外波段敏感,故其是一种性能优越的光电导材料。

### 2.2 光阻隔层

碲化镉(CdTe)薄膜对蓝、绿光有较强的吸收,而钒氧酞菁(VOPc)薄膜对红光具有较强的吸收,故他们具有近似互补的吸收光谱。CdTe、VOPc 在可见光波段的吸收系数分别如图 3 中(a)和(b)所示<sup>[3]</sup>。碲化镉和钒氧酞菁复合多层吸收薄膜在全光谱范围内都有良好的吸收特性,其双层膜的透过率均小于 0.5%,是一种制作高放大倍数光寻址液晶光阀光阻隔层的理想材料。由于 VOPc 是有机大分子材料,其薄膜的黏着强度不好,制作时膜层容易脱落,因此在制备时可加入过渡层 SiO。复合光阻隔层的结构采用 SiO + CdTe + VOPc + CdTe + SiO。在最佳工艺条件下,实测复合光阻隔层对三基色的光吸收系数分别为:  $a_R = 7.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 、 $a_G = 6.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 、 $a_B = 7.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ,完全满足光阻隔层的

要求<sup>[4]</sup>。

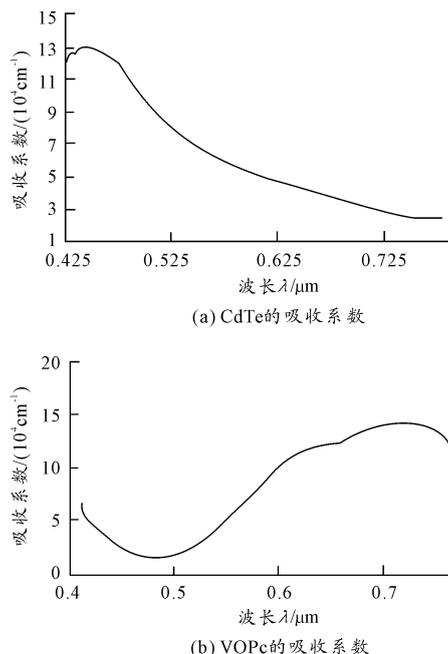


图 3 CdTe 和 VOPc 的吸收曲线

### 2.3 液晶层

铁电液晶(ferroelectric liquid crystal, FLC)是一种手性近晶 C 相液晶,其分子呈现无序堆积,且具有螺旋状结构,在电场(或磁场)作用下其极化方向发生改变,即具有铁电性。铁电液晶最大的优点是响应速度快和可执行记忆操作,此外还具有激光损伤阈值高、直流介电常数低、吸收系数低以及化学和结构稳定性好等优点,并且可在一定温度范围显示光学各向异性的通性。由于自发极化特性,使得铁电液晶比其他液晶有小几个数量级的响应时间,将铁电液晶用于光寻址液晶光阀,响应时间通常保持在微秒量级。

### 2.4 介质反射镜

光寻址液晶光阀要求介质反射镜有尽可能高的反射率、尽可能大的电阻率以及尽可能大的反射带宽。这里选择 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>。SiO<sub>2</sub> 是分解很小的低折射率氧化材料,其折射率为 1.45,透明区一直延伸至紫外(0.2 ~ 2.0  $\mu\text{m}$ ),他的光吸收很小,消光系数  $k$  大约为  $10^{-6}$ ,膜层牢靠、耐磨、抗腐蚀。TiO<sub>2</sub> 折射率高,其折射率为 2.25,在可见和近红外区透明(0.35 ~ 12  $\mu\text{m}$ ),消光系数约为  $10^{-4}$ ,膜层牢靠稳定。实测的介质反射镜的反射率一般在 99.5% ~ 99.8%,完全满足光寻址液晶光阀的要求。

通过对关键膜层的合理选取,最终提出了一种高性能的 OA-LCLV,该器件使用 a-Si:H 作为光电导层,使用 CdTe 和 VOPc 复合膜层作为光阻隔层,使用 FLC 作为液晶层,使用 SiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 复合材料作为介质反射镜。

## 3 a-Si:H/FLC-OALCLV 特性分析

### 3.1 电学模型

由光寻址液晶光阀的内部结构可知,光阀内部各膜层在

电学上是串联关系。光电导层和光阻隔层之间会产生 1 个异质结,类似 1 个二极管。多层膜介质反射镜的电阻率远远大于光电导层和液晶层材料,因此反射镜可以等效成 1 个电容器。该类型光寻址液晶光阀分割单元的等效电路如图 4 所示。图 4 中: $R$  表示外接电阻; $C_m$  表示介质反射镜的电容; $D$  表示由光电导层指向光阻隔层的二极管; $C_{ph}$ 、 $R_{ph}$  和  $C_{FLC}$ 、 $R_{FLC}$  分别表示光电导层和铁电液晶的电容、电阻。

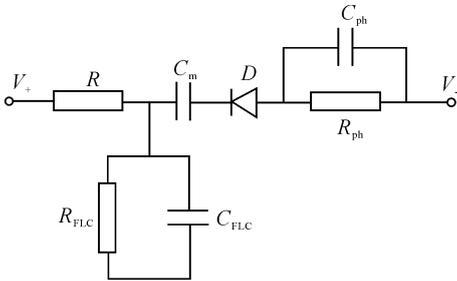


图 4 a-Si:H/FLC-OALCLV 等效电路

从图 4 中可以看出:在暗态时,非晶硅光电导层的电阻高,这时由于外电阻  $R$  与光电导层暗电阻的电压分配作用使 FLC 上端的电位相对于接地端为正,液晶层处于关的状态;在光照时,由于光电导层电阻下降,使 FLC 上端电位变为负,当充电足够时 FLC 就处于开的状态,切断光源后, $R$  又可使 FLC 重新处于正态。可见,利用这样的原理便可用光电导层将输入光信息传感至液晶层,使液晶层达到利用写入光调制读出光的目的。

该类型的光寻址液晶光阀可以实现二维并行输入,理论上分辨率可达 100 lp/mm 以上,比 FLC/集成电路器所达到的分辨率更高。典型器件的灵敏度约为  $100 \text{ nJ/cm}^2$ ,帧速达 1 kHz,对比度达 100:1 以上<sup>[5]</sup>,具有很大的应用潜力。

### 3.2 性能影响因素分析

光寻址液晶光阀的性能指标主要有空间分辨率、响应速度、光灵敏度、对比度等。

空间分辨率与多种因素有关,如光电导层厚度、液晶层的性能、光生载流子迁移率等,而最主要的影响因素是光电导层载流子的横向扩散。当光电导层受光照时,由于其表面区域所受光照强度不一样,使其表面的光生载流子浓度也不一致,这样由于载流子浓度梯度的原因,可使 1 个像元面积上的光生载流子发生横向扩散,其结果就是该像元面积扩大,导致相邻像元容易发生相互干扰,从而使分辨率下降。因此,要想提高液晶光阀光导层的分辨率,可以通过减小光生载流子的横向迁移率来实现。如果能使光生载流子的迁移率在横向与纵向各向异性,通过减小载流子的横向迁移率使其小于纵向迁移率,则液晶光阀的分辨率将会得到提高。柱状结构薄膜具有各向异性的特殊结构,晶态与非晶态复合柱状结构薄膜的载流子迁移率在纵向与横向呈现各向异性,纵向电导率大于横向电导率,表明柱状结构薄膜可以提高液晶光阀的分辨率<sup>[6]</sup>。此外,液晶光阀的分辨率还与光阻隔层的厚度有关,阻隔层厚度增加会导致液晶光阀分辨率降低,但厚度的减小又会对阻隔层的吸收系数提出较高的要求。

写入光和擦除光对 FLC-OALCLV 的响应特性有影响,其上升时间都在微秒量级上,擦除效应发生的临界值都在  $\text{mW/cm}^2$  量级。同时,光电响应速度随控制光的变化而变化,即都随写入光的增大而加快,随擦除光的增大而减慢。提高写入光强度以及激励信号幅度均可提高 OALCLV 的响应速度;反之,增大擦除光强度和激励信号频率则会降低响应速度<sup>[7]</sup>。当写入光强度变化时,调制器的响应速度随写入光强度的增加而加快的原因是由于铁电液晶在写周期负充电的速度正比于写入光强度。当光子在氢化非晶硅中被吸收时,移动的电荷载体被用来使 FLC 发生光轴旋转,因此若光变强则驱动 FLC 的电荷就加快,从而导致响应速度也加快。

光寻址液晶光阀的光灵敏度主要由光电导材料的性能决定。氢化非晶硅薄膜中 H 含量对薄膜的光敏性有着极其重要的影响。随着 H 稀释比的不断增加,H 对生长表面的轰击不断增强,这些轰击能优先消除高能缺陷结构而留下稳定的结构,从而使生长层结构致密,减少缺陷态密度,提高薄膜的光敏性。此外,在制备过程中随着镀膜循环次数的增加,氢在刻蚀表面时来不及充分地扩散,参与了下一步的成膜过程,使层与层之间的缺陷态比较多,会导致光敏性变差<sup>[8]</sup>。

若光寻址液晶光阀采用光学平面代替玻璃平板,则其对比度将得到提高;但当读出光的强度过高又会使光寻址液晶光阀的对比度下降。另外,合理控制驱动电源的频率对提高光寻址液晶光阀的性能也具有重要意义。驱动频率太高,会使系统响应跟不上,从而没有足够时间进行开态和关态的转换,造成对比度下降;驱动频率太低,又会使与图像相关所产生的电荷有时间扩散,造成分辨率下降。因此,在实际应用中应综合考虑器件的整体结构、特性参数而选择一种中间最佳状态。

当然,光寻址液晶光阀的性能不仅仅由上述因素决定,还有很多后续工作需要研究,其研究途径为:根据建立的等效电路模型,合理地选择器件参数,利用 PSpice 软件进行模拟仿真,最后通过实验进行验证。另外,在研制该器件过程中需注意的关键技术有:铁电液晶的良好定向;a-Si:H 光敏层的设计和制作;a-Si:H 光敏层与 FLC 层的合成以及电学特性的匹配;工作点的选择等。相信随着研究的深入和关键技术的改进,该器件的性能势必会得到更大的提高,其应用领域会得到很大的拓展,其潜在的优势将会得到充分体现。

## 4 结束语

自液晶光阀出现以来,人们一直在为提高其性能而进行着不懈的努力。本文对影响光寻址液晶光阀的关键膜层进行了分析和研究,提出了该器件的等效电路模型,为以后进一步研究打下基础,最后又对光寻址液晶光阀的性能指标如空间分辨率、响应速度、光灵敏度和对比度等影响因素进行了分析,并指出了今后研究的途径。总之,本文提出的光寻址液晶光阀具有很强的应用潜力,探索更合适的制备条件和开发更合适的薄膜材料是光寻址液晶光阀实用化过程中应该解决的重要问题。(下转第 146 页)