

18-22

铁电液晶空间光调制器氢化非晶硅薄膜 p-i-n 光敏层的研究*

朱振才 秦伟芳 陈杰 王汝莹 严义垣

(中国科学院上海技术物理研究所, 青年光电工程研究中心, 上海, 200083)

A 摘要 描述了氢化非晶硅/铁电液晶空间光调制器的结构和工作原理, 并从器件的电学模型出发, 着重讨论了整体器件对光敏层的特性要求, 对 a-Si:H 薄膜 p-i-n 光敏层的制作和光电特性进行了研究.

关键词 光敏层, 氢化非晶硅, 薄膜, 铁电液晶, 空间光调制器.

TN304.12

0471

引言

光寻址空间光调制器(OASLM)是一种可以根据输入的写入图像调制读出光束特性的光电转换器件, 作为光信息处理等应用中的关键器件, 可以完成二维图像的波长转换、非相干干涉图像转换和图像增强等多种功能. OASLM 通常以液晶层作为光调制材料, 半导体材料或薄膜(如 c-Si、BSO、GaAs 晶体和 CdS、a-Si:H 薄膜等^[1-3])作为光敏层. 光敏层吸收写入光图像并产生相应空间变化的电场分布, 调制层则可根据电场分布实现对读出光的调制. 用于空间光调制器的液晶主要是向列型液晶(NLC)和铁电液晶(FLC). NLC 响应外电场幅值面与其极性无关, 响应时间在几十毫秒量级. FLC 的响应与外电场的极性和幅值有关, 常用的表面稳定型铁电液晶(SSFLC)具有双稳态响应特性, 响应速度比 NLC 快得多, 响应时间与外电场成反比, 达几十到几百微秒量级^[4].

氢化非晶硅(a-Si:H)薄膜具有良好的空间分辨率、光灵敏度、光谱响应特性和高的响应速度, 而且易于制成大面积薄膜. 因而可用 a-Si:H 薄膜作为光敏层、FLC 作为光调制层构成光寻址铁电液晶空间光调制器, 进行二维光信号和图像的实时输入和处理, 在光信息处理及光计算、光存储等研究中具有很好的应用前景.

本文分析了这种氢化非晶硅/铁电液晶(a-Si:H/FLC)空间光调制器的结构和工作原理, 并结合对电学模型和等效电路的讨论, 着重分析了整体器件对光敏层的要求, 对 a-Si:H 薄膜 p-i-n 光敏层的制作和光电特性进行了研究、测试和讨论.

1 铁电液晶空间光调制器的结构及工作原理

我们讨论的光寻址 a-Si:H/FLC 空间光调制器通常由夹在两透明电极之间的光敏层、

*上海市科技发展基金博士后科研资助计划资助项目
本文 1995 年 6 月 10 日收到, 修改稿 1995 年 8 月 4 日收到

4

反射层、液晶定向层和液晶层等一系列多层膜构成,图 1 为这种光寻址 a-Si:H/FLC 器件的典型结构图,为提高光敏层的响应速度,采用 a-Si:H p-i-n 光电二极管作为光敏层,这种光敏层可用等离子辉光放电(PECVD)技术制备,在透明电极上依次淀积硼掺杂的 p 层、本征层 i 和磷掺杂的 n 层,形成 p-i-n 结构,分别在透明导电膜和反射层上倾斜蒸镀 SiO 层或采用聚合物摩擦等方法使铁电液晶定向,方波驱动电压通过两侧的透明导电膜(ITO)加到光电二极管和液晶层上,选取 FLC 的厚度 d 满足 $2d\Delta n = \lambda/2$,其中 Δn 为双折射系数, λ 为读出光的波长,使之成为可控的半波片。

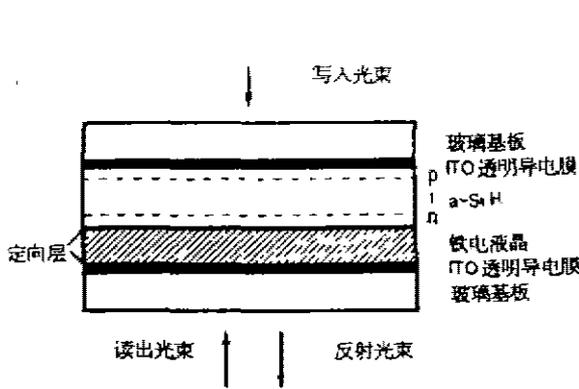


图 1 光寻址 a-Si:H/FLC SLM 结构图
Fig. 1 Schematic diagram of the a-Si:H/FLC OASLM

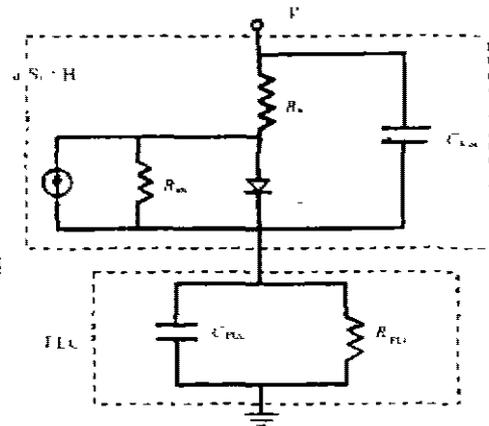


图 2 a-Si:H/FLC SLM 等效电路
Fig. 2 Equivalent circuit of the a-Si:H/FLC SLM

a-Si:H/FLC SLM 的等效电路如图 2 所示,图中 C_{FLC} 和 R_{FLC} 分别表示液晶的电容和电阻, R_s 为包括 a-Si 体电阻与对应导电膜电阻之和, R_{ph} 表示光电二极管的反向电阻, $C_{s,i}$ 是光电二极管电容,包括几何电容和与频率有关的 p-i-n 结耗尽层电容两部分,理想状态下,当电压为正(正向偏压)时光电二极管导通,电压主要降在液晶层上,这时定义为 OFF 态,而反向偏压(电压为负)无光照时,光电二极管不导通,则液晶层上无压降,故仍保持 OFF 态,若反偏时有光照,则在光电二极管(导通)作用下使反向电压降在液晶层上,从而使光照区域成为 ON 态,这样就可以通过控制写入光束和电压极性得到 OFF 和 ON 两种状态。

2 器件对光敏层的特性要求

由于 FLC 响应外电场的幅值和极性,FLC 通常用方波电压驱动,要求光敏层具有非对称的光电特性,因此通常采用 a-Si:H 薄膜型 p-i-n 光电二极管作为光敏层^[1]。

实际上,为保证器件正常工作,一方面应使 $R_s \approx R_{FLC}$,使正偏时液晶层上的电压接近 V_s ,同时保证反偏无光照时 FLC 上的压降很小,另一方面应使 $R_s \gg R_{FLC}$,这样反偏无光照时才能使 FLC 上电压接近于零,否则在 FLC 上引起的负电压使 FLC 在无光照时也处于 ON 态,另外,对称方波电压下,若 $C_{a-Si} > C_{FLC}$,则使二极管阻抗下降,而液晶层上的压降增

加,也会使无光照时的 FLC 处于 ON 态. 因此,在光电二极管的结构设计中,应保证 $R_s \ll R_{FLC}$, $R_{sb} \gg R_{FLC}$ 和 $C_{i-s} > C_{FLC}$, 即使 $a-Si:H$ 的体电阻和电容尽量小而反向漏电阻尽量大.

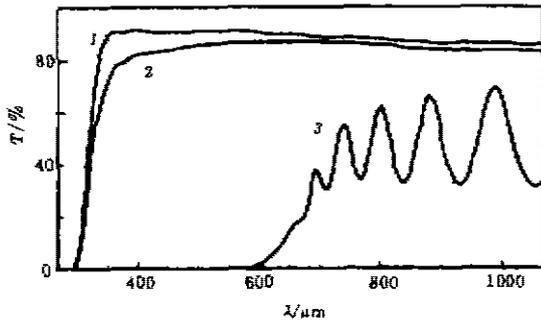


图3 a-Si:H 的可见及近红外透射光谱
Fig. 3 Transmittance spectra of the PECVD a-Si:H films

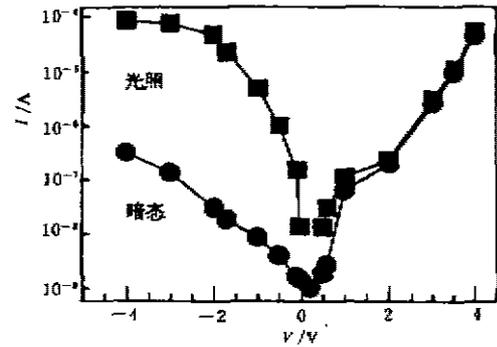


图4 a-Si:H 薄膜 p-i-n 光敏层的光照和暗电流-电压 ($I-V$) 特性
Fig. 4 $I-V$ characteristics of the a-Si:H p-i-n photodiode in the dark and under white-light illumination

考察由频率为 f 的 V_- 到 V_+ 的方波电压驱动的 FLC SLM. 无写入光照时,光敏层在负电压周期的暗电流必须足够小,从而不能对 FLC 充电而置 ON. 因此负电压时的暗电流 I_d 必须满足

$$I_d \gg 2f(C_{FLC} + C_{i-s})|V_-|. \quad (1)$$

这里将上述的光敏层进一步等效成电阻 R_{i-s} 和电容 C_{i-s} 的并联,式中 C_{FLC} 和 C_{i-s} 分别是液晶和光敏层的电容. 同时为了防止无写入光照时 FLC 置 ON, 应使在驱动方波的每一负电压阶后由于电容分压而形成的 FLC 上的电压非负, 则意味着 $C_{FLC} = C_{i-s}$, 即

$$d_{FLC}/\epsilon_{FLC} = d_{i-s}/\epsilon_{i-s}. \quad (2)$$

式中 d_{FLC} 和 ϵ_{FLC} 分别为液晶层的厚度和介电常数, d_{i-s} 和 ϵ_{i-s} 分别为光敏层的厚度和介电常数. 由于液晶的介电常数约为 a-Si:H 光二极管的 1/3, 因而 a-Si:H 光敏二极管的厚度应是 FLC 层的 3 倍^[6].

另外,为使 FLC 完全置 OFF(擦除)态,在方波正电压周期光敏层必须提供足够电荷,这可由正向偏置的光电二极管提供,最小电流应满足

$$I_c \gg 2f[C_{FLC} + C_{i-s}]|V_+| + 2P, \quad (3)$$

式中 P 为 FLC 的自极化强度.

以上是 FLC OASLM 对光敏层光电性能的基本要求,此外还有横向电阻率(限制器件的空间分辨率)、光谱响应以及响应速度等方面的要求.

3 a-Si:H 薄膜 p-i-n 光敏层的制作和特性测试

实际制作时我们将光敏层的结构设计为 a-Si:H 薄膜型 p-i-n 光敏二极管. a-Si:H 层的

厚度直接影响器件的工作性能,太薄则电容大,在写入周时,尽管无光照,也仍有较大的电压降在 FLC 上而使器件置 ON 态.相反,如果太厚则电容小,写入周时,大部分电压将降在光敏层而不是液晶上.最佳的厚度应是使 a-Si:H 的电容与 FLC 的大致相等,即 a-Si:H 的厚度为 FLC 的 3 倍.由于表面稳定型结构要求液晶层厚为 $1\sim 2\mu\text{m}$,考虑到实际制作工艺,a-Si:H 的厚度设计为 $2.5\mu\text{m}$.

a-Si:H 薄膜采用辉光放电等离子体化学汽相沉积方法制备,沉积温度为 $250\sim 300^\circ\text{C}$,功率控制为 $100\sim 200\text{W}$,反应气体为 SiH_4 ,掺杂气氛 B_2H_6 和 PH_3 的浓度分别为 2% 和 1%,基底为镀有 ITO 电极的玻璃,p 层和 n 层的厚度分别约为 200 和 300\AA ,首先沉积 p 层并且重掺杂,使之与 ITO 具有良好的电接触,然后是本征层 i 层,最后沉积的 n 层轻掺杂,使其电阻率较高,以保持器件的空间分辨率.实际制备的光敏层的 i 层厚度为 $1.5\sim 2.0\mu\text{m}$,并分别在两侧的 ITO 和 n 层上沉积 Cr、Al 电极以备测试.

图 3 中曲线 3 为在 PE-Lambda2S 分光光度计上测得的 a-Si:H 薄膜的透射光谱,其中曲线 1 和 2 分别为玻璃基底和镀 ITO 玻璃的透射光谱. a-Si:H 光敏层的光照(白光, 4000lx)和暗电流-电压(I - V)特性如图 4 所示.可见,在光敏二极管反向偏置时,暗电流很小并随电压的增加而增大,这表明其暗电阻很高,对提高和控制器件的性能是有利的.而光照下,光电流随电压的增加而显著增大,并在电压为 $2\sim 3\text{V}$ 时趋向于饱和,相同电压下光照和暗电流比可达 $10^2\sim 10^3$ 量级.这样,使 a-Si:H 光敏层在反向偏置时成为光控开关(阻抗变化).而当光敏二极管正向偏置时,光照和暗电流变化趋势都是在一定的电压时迅速增加,即二极管趋于导通,使大部分电压都降在液晶层上,这说明 p-i-n 光敏层的光电特性可以满足 FLC SLM 器件的要求.

从前面我们对光寻址 FLC SLM 工作机理和电路模型的分析可知,在理想情况下,当 a-Si:H 反偏时,暗电流应尽量小,而有光照时的光电流随电压的增加应很快达到饱和,即光照时 I - V 特性曲线尽量陡.正偏时,电流随电压增加应很快增大.上面的测试结果表明:反偏时的暗电流还不够小,且随电压增加有较快增大的趋势,这主要是由于 p-i-n 结构中的 i 层还不够厚所致.

4 结语

我们介绍了铁电液晶空间光调制器性能和结构特点,从分析光寻址 a-Si:H/FLC 器件结构原理和电学模型入手,导出了为使器件正常工作对光敏层结构参数、光电特性等方面的要求,并结合 a-Si:H 薄膜 p-i-n 光敏层的制作工艺研究对其光电特性作了测试和分析.结果表明,工作电压下光照态和暗态电流之比达到 $10^2\sim 10^3$,基本满足 FLC SLM 器件光电性能的要求.

致谢 实验样品制备中得到中国科学院上海硅酸盐所黄慈祥和钟伯强先生的大力协助,在此表示衷心感谢.

参考文献

- 1 Efron U. *Opt. Eng.*, 1983, **22**:682
- 2 朱振才. 液晶光阀光电导薄膜的研究. 浙江大学博士学位论文, 1993.
- 3 Ashley P R, et al. *Appl. Opt.*, 1987, **26**:241
- 4 Clark N A, Lagerwall S T. *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **36**:899
- 5 Moddel G, Johnson K M, Handschy M A. *Proc. SPIE*, 1987, **754**:207
- 6 Barbier P R, Moddel G. *Appl. Opt.*, 1992, **31**:3898

HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON THIN FILM p-i-n PHOTOSENSOR FOR FERROELECTRIC LIQUID CRYSTAL OPTICALLY ADDRESSED SPATIAL LIGHT MODULATORS*

Zhu Zhencai Qiu Weifang Chen Jie Wang Ruli Yan Yixun

*(Optoelectronic Engineering Research Center, Shanghai Institute of Technical
Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)*

Abstract The general structure and operation of the hydrogenated amorphous silicon/ferroelectric liquid crystal spatial light modulators (FLCSLMs) were described in detail. The electrical requirements of photosensors for FLCSLMs were discussed and derived from the a-Si:H/FLC SLM electrical model and equivalent circuits. Fabrication and photoelectric characteristics of the a-Si:H thin film p-i-n photosensors were investigated.

Key words photosensors, hydrogenated amorphous silicon, thin film, ferroelectric liquid crystal, spatial light modulators.

*The project supported by the Shanghai Science and Technology Development Foundation