

CdS/CdTe 异质结-液晶型非相干-相干图像转换光阀的研究

钟启明 赵焕卿 贾玉润 章志鸣

(复旦大学物理系)

1982年9月6日收到

提 要

本文报道了用 CdS/CdTe 光敏薄膜异质结和扭曲向列相液晶所构成的交流图像转换光阀的研制结果,讨论了组成光阀的各膜层参数对光阀性能的影响。分析表明,光阀性能的提高不仅有赖于各膜层的参数,而且和这些参数之间的匹配密切相关。

一、引 言

本文所讨论的图像转换光阀,亦称交流液晶光阀,是七十年代中为解决实时光信息处理而发展起来的一种新型光学器件^[1],其结构如图1所示。它在光信息处理中有着重要应用^[2-4]。

我们在研制交流液晶光阀的过程中,经过多次反复,掌握了一套制备光阀的关键膜层组: CdS 膜、CdTe 膜的工艺方法。其中,用热蒸发工艺制备的 CdS 光导膜直流暗电阻率达 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,200lx 白光照明时的暗/亮电阻率之比达 10^3 。目前,由这些膜层构成的交流液晶光阀的主要参数已达到: 1) 分辨率 > 30 线对/mm (极限分辨率), 2) 对比度 90:1 (局部对比度), 3) 光响应阈值光强 ($2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), 4) 响应时间: 上升 30ms, 下降 250ms。

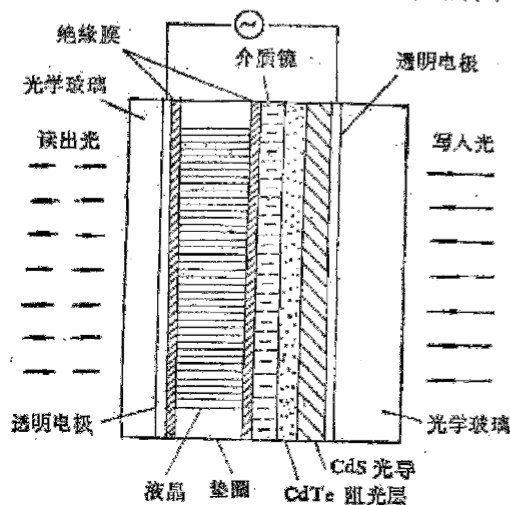


图1 交流液晶光阀的结构

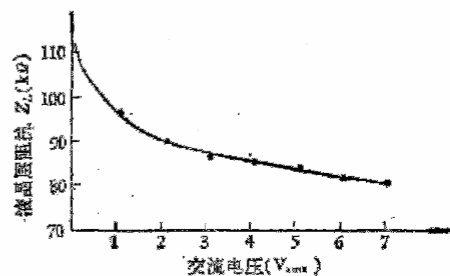


图2 45° 扭曲的向列相液晶层的阻抗变化

二、液晶层的光学及电学特性测量

液晶层是用普通的手表中液晶显示屏的制备工艺制成的。液晶盒厚约 $10\mu\text{m}$ ，前后表面间分子的扭曲为 45° 。液晶材料为正性向列相液晶 ($\Delta\epsilon \cong 11$, $\Delta n \cong 0.2$)，阈值电压 $V_{\text{th}} \cong 1.2V_{\text{rms}}$ ，具有很高的电阻率 ($> 10^{10}\Omega \cdot \text{cm}$)。由于液晶分子的导电、介电各向异性，所以其电阻、电容都是外加电压的函数，为此我们测量了该液晶层的交流阻抗随外电压的变化，其结果如图 2 所示，测量样品的电极面积为 1cm^2 。测量时交流电压的频率为 2kHz 。由图 2 可见，当液晶层上的电压由 0V 增加到 7V 时，液晶层的阻抗在 $115\text{—}80\text{k}\Omega$ 之间变化。

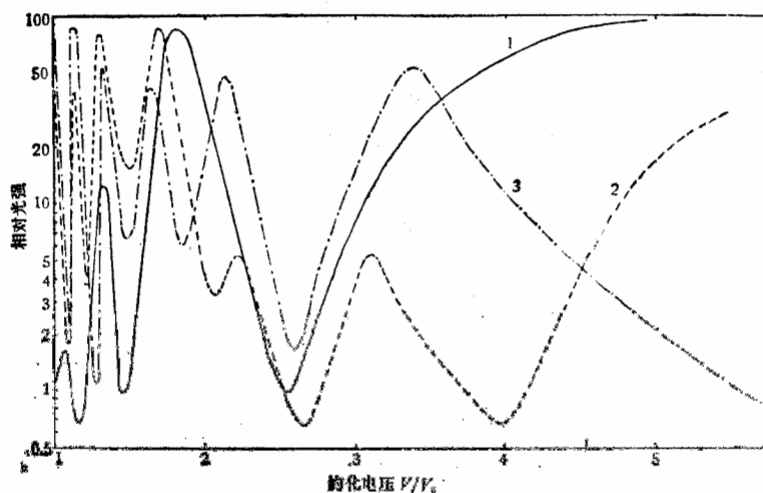


图 3

为了确定光阀中液晶层工作电压的动态范围，我们又测量了 $10\mu\text{m}$ 厚的反射式 45° 扭曲的向列相液晶层的透光特性曲线，其结果由图 3 给出，其中的 1, 2, 3 三条曲线分别对应入射光的线偏振方向和液晶层前表面的分子长轴之间的夹角为 0° ; 22.5° ; 45° 三种情况。测量时，液晶盒置于两正交偏振片之间。曲线 1 表示，当液晶层上的约化电压 V/V_{th} ($V_{\text{th}} = 1.2V_{\text{rms}}$ 是液晶层的阈值电压) 在 $1.8\text{—}2.5$ 和 $2.5\text{—}4.6$ 变化时，其透光曲线的对比度达 $90:1$ 以上。所以该液晶层实际交流电压动态范围为 $2\text{—}3V_{\text{rms}}$ 和 $3\text{—}5.5V_{\text{rms}}$ 。

三、CdS, CdTe 膜的制备及异质结的特性测量

由 n 型 CdS 光导膜和 p 型 CdTe 光吸收膜组成的光敏异质结是交流液晶光阀的关键膜层组。为了和光阀中具有很高的直流电阻率 ($> 10^{10}\Omega \cdot \text{cm}$) 的液晶层实现阻抗匹配，光敏异质结必须具有与其相近的暗态直流阻抗和相应的交流阻抗。作为光敏层，异质结的暗/亮阻抗比也不能太小。利用测得的液晶层参数和交流液晶光阀的等效电路^[5]，不难求出对 CdS/CdTe 异质结的阻抗要求和暗/亮阻抗比分别为：暗态阻抗大于 $130\text{k}\Omega$ (2kHz 的

频率下),暗/亮交流阻抗比大于 8。由异质结特性分析,可以求出对 CdS 光导膜的暗态直流电阻率要求为 $1.3 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,膜厚为 $12 \mu\text{m}$ 。而对于 CdTe 膜,要求它的光吸收系数达 10^3 以上。下面介绍满足上述要求的 CdS, CdTe 膜的制备方法以及由此得到的 CdS/CdTe 光敏异质结的特性测量结果。

1. CdS 光导膜的制备

由于 CdS 是一种易在高温下分解的化合物半导体,所以很难用常规的热蒸发工艺直接镀制出高电阻率的、具有良好光敏特性的 CdS 光导膜。我们受 Böer 等人^[6]介绍的方法的启示,用蒸发掺铜的方法来制备高阻 CdS 光导膜,取得了较好的效果,所制备的 CdS 光导膜的暗态电阻率达 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上,光响应峰值的波长为 $5350 \text{ \AA}$,暗/亮电阻率之比达 10^3 左右。

2. CdTe 光吸收膜的制备和异质结的形成

在已经掺杂处理的 CdS 光导膜上,我们采用真空热蒸发的方法再淀积一层厚为 $1 \mu\text{m}$ 左右的 CdTe 光吸收膜,然后用高温退火,就形成一个 CdS/CdTe 光敏异质结。所制备的 CdTe 膜,电阻率达 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$,厚为 $1 \mu\text{m}$ 时,对波长为 $6328 \text{ \AA}$ 的 He-Ne 激光的光强衰减达 10^3 以上。这已能满足光阀的要求。

3. CdS/CdTe 光敏异质结的特性测量

1) 异质结交流伏安特性 对交流液晶光阀来说,异质结的最重要参数就是它的阻抗特性和光敏特性,而这个特性我们通过测量异质结在不同光照强度下的交流伏安特性来得到。我们用 2kHz 的交流频率的电压源和波长为 $6328 \text{ \AA}$ 的 He-Ne 激光照明光源,对面积为 1cm^2 的异质结进行了测量,其结果如图 4 所示。由图 4 给出的结果可以算出, CdS/CdTe 异质结的暗态交流阻抗(在 2kHz 频率下)已达 $130\text{k}\Omega$ 以上。而当亮态光照条件为 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,异质结的暗/亮阻抗比已达 10。这样的阻抗参数能满足液晶阻抗匹配的要求。

2) 异质结的结电容和结电阻及 L/D 的测量 我们用 CD-7A 型精密万用电桥对面积为 1cm^2 的异质结测量了结电容和结电导随光照的变化,其结果如图 5 所示。暗态时 1cm^2 的异质结结电容为 680pF ,结电导为 $0.3 \mu\text{S}$ 左右,而当照明光强达 $150 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,结电容和结电导分别变成了 2500pF 和 $38 \mu\text{S}$ 。在这个过程中,结电容的光敏变化约为 3.5 倍,而结电导却变化了 125 倍。显然,光电容的光敏变化比光电导的变化小得多。这一结果告诉我们, CdS/CdTe 异质结的光敏特性受交流电压的频率的影响很大。当交流频率

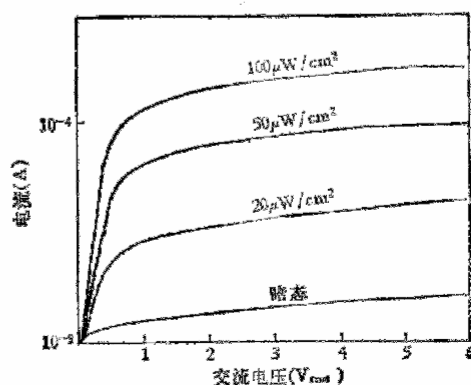


图 4 异质结交流伏安特性

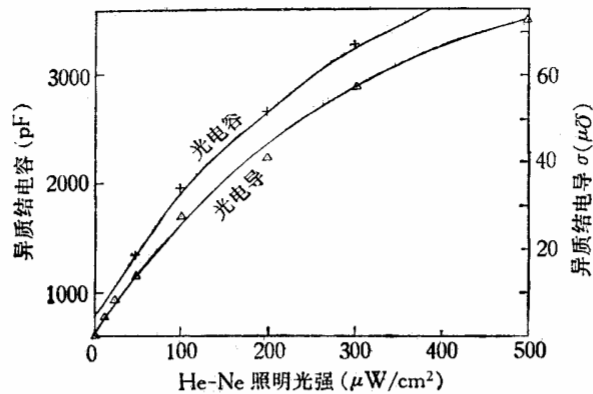


图 5

较高时,通过 CdS/CdTe 异质结的结电流将以电容电流为主,而由于异质结电容的光敏变化较小,则必然使得通过异质结的亮/暗(L/D)电流之比随之变小。而当交流电压的频率较低时,通过异质结的电流将以电阻电流为主,故异质结的 L/D 必将随之增加。我们的测量结果证实了这一点。我们固定异质结的亮态照明光强为 $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (He-Ne 激光),分别测量了各种交流频率下异质结的 L/D ,得到了如图 6 所示的结果。当交流频率为 100Hz 时,异质结的 L/D 约为 20,但当交流频率达 10^5Hz 时异质结的 L/D 降为 2—3 了。所以,交流液晶光阀的工作频率一般不超过 10^5Hz 。

3) 异质结的交流光响应速度 异质结的光响应速度无疑是影响交流液晶光阀的光响应速度的重要因素之一,为此我们在 2kHz 的交流频率下测量了异质结的光响应速度,测量时,照明光光强为 $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$,这时,它的上升、下降时间均在 20ms 左右。

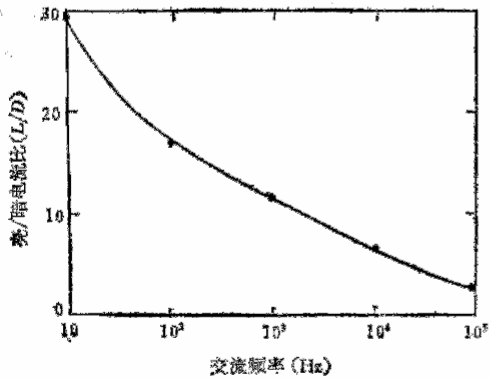


图 6

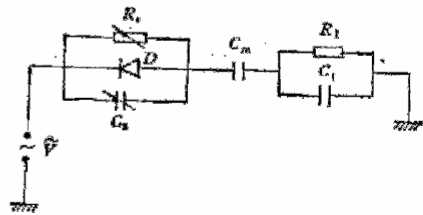


图 7

四、光阀中异质结和液晶层的阻抗匹配

讨论交流液晶光阀中各膜层的阻抗匹配可以用图 7 给出的等效电路来进行。其中 R_1 , C_1 分别为液晶层的等效电阻和等效电容; R_s , C_s 分别为异质结的等效结电阻和等效

结电容; D 仅是表示 $p-n$ 结存在的符号; C_m 是多层介质反射镜的等效电容, 因为介质反射镜的体电阻接近无穷大, 所以等效电路中略去了介质反射镜的体电阻 R_m . 对面积为 1cm^2 的各膜层, 用精密电桥可以测出 $R_1 = 10^8\Omega$, $C_1 = 900\text{pF}$, $C_m = 4200\text{pF}$. 暗态时, $R_s = 3.3 \times 10^6\Omega$, $C_s = 680\text{pF}$, 光照强度为 $150\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, $R_s = 2.6 \times 10^6\Omega$, $C_s = 2500\text{pF}$. 若将异质结参数和液晶层参数作一些比较, 我们可以发现, 在直流阻抗上, 液晶层的等效电阻比异质结等效电阻要大几十倍, 相差一个数量级以上, 所以若选择光阀工作电压的频率比较低, 则由于液晶层和异质结之间阻抗失配, 必然使光阀无法工作. 选择较高的光阀工作频率, 可以使光阀中的电容电流占主导地位. 由于液晶层电容和异质结结电容的大小在同一数量级, 就使得液晶和异质结之间的匹配易于实现. 然而, 光阀的交流工作频率也不能太高, 因为随着频率增加, 异质结的 L/D 将随之下降, 而太小的 L/D 同样将使得匹配无法完成. 由上面给出的参数, 可以推算在 2kHz 左右的交流频率下, 液晶层和异质结之间能实现阻抗匹配. 液晶层特性参数的测量结果告诉我们, 当液晶层上的交流电压在 $2-3V_{rms}$ 和 $3-5V_{rms}$ 两个范围内时, 液晶层上读出光的强度变化的对比度可达 $90:1$. 在我们的光阀中, 如果由写入光强引起的异质结的阻抗变化, 能使液晶层上交流电压的变化范围分别覆盖这两个区域, 异质结和液晶层之间就实现了所谓阻抗匹配. 令液晶、介质镜、异质结上的电压分别为 V_1 , V_m , V_s , 可得各膜层上的电压分配为

$$\text{暗态 } V_1:V_m:V_s = 3:0.6:4;$$

$$150\mu\text{W}/\text{cm}^2 \text{ 的亮态 } V_1:V_m:V_s = 5.5:1.2:0.9.$$

即液晶层上的交流电压的动态范围恰为 $3-5.5V_{rms}$. 若取光阀的工作电压为 $5V_{rms}$, 频率仍为 2kHz , 则随异质结亮、暗阻抗的变化, 液晶层上的电压动态范围为 $1.9-3.6V_{rms}$, 已经超出了要求.

目前, 我们所研制的 CdS/CdTe 异质结的交流阻抗都已达到了上述参数指标, 有一些异质结有更高的暗态阻抗和 L/D , 所以可在更低的亮态光照强度下完成匹配.

五、交流液晶光阀的特性测量

通过摸索掌握 CdS 光导膜、CdTe 光吸收膜的制备工艺, 测量各膜层的特性参数并选择异质结和液晶层之间恰当的阻抗匹配, 我们初步得到了性能较好的 CdS/CdTe 异质结-液晶型图像转换光阀. 下面介绍本光阀的几个主要性能参数的测试结果. 图 8 为交流液晶光阀进行图像变换和特性测量的基本光路图. 我们用输出光强为 1.5mW 的 He-Ne 激光器扩束准直后作读出光, 它通过分光镜后进入光阀的液晶层, 从液晶层返回的椭圆偏振光经检偏器后由透镜成像在读出光屏上. 写入光用普通的溴钨灯, 由于本光阀的光响应灵敏度较高, 所以写入像可以是实物的反射成像. 照明用的溴钨灯的功率为 50W . 当有写入图像投射在光阀的 CdS 膜上时, 在读出光光屏上就可以实时地显示出相同的相干光图像.

1. 光阀的图像分辨率

我们用分辨率卡来测量光阀的分辨率. 测量是在图 8 所示的系统中将分辨率卡缩小

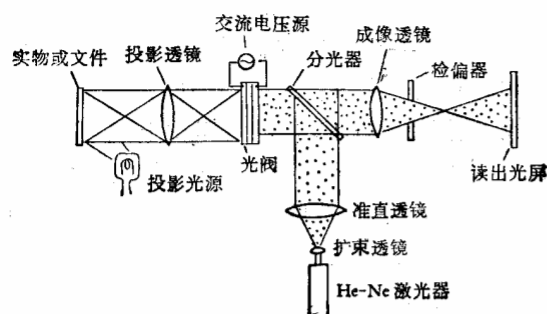


图 8

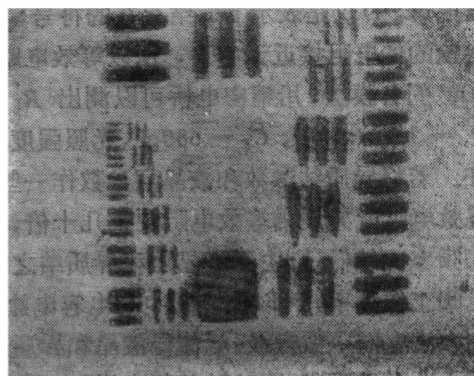
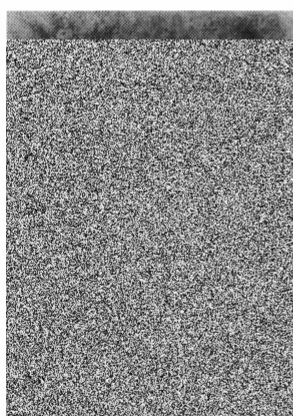


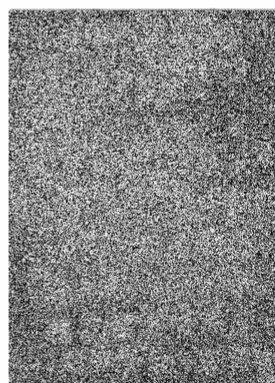
图 9 光阀对分辨率卡的显示

投影在光阀的写入面上,用 He-Ne 激光在光阀的液晶层读出面上读出的,图 9 是在光阀读出光屏上记录下来的放大的读出像。其中最小线对的频率为 20 线对/mm。

图 10 中的两张照片是将非相干光照明的幻灯片缩小成像在光阀的写入面上后,用 He-Ne 激光读出的。非相干光在光阀上的成像面积约 $10 \times 15 \text{ mm}^2$ 。图中 (a)、(b) 两张照片是通过调节光阀的工作电压,使光阀输出图像的对比度反转后拍摄下来的。



(a)



(b)

图 10 光阀显示中文字母的效果

2. 光阀的输入-输出特性和对比度

我们用波长为 $6328 \text{ \AA}$ 的 He-Ne 激光扩束后作写入光和读出光,测量了光阀的写入光对读出光的调制曲线,见图 11。测量时,光阀的工作电压为 $7.4 \text{ V}_{\text{rms}}$,交流频率为 2 kHz 。写入光强为零时,光阀处暗态,写入光强达 $150 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,光阀读出光强的相对值已达 90 (暗态读出光的相对光强为 0.6),光阀已有 90:1 以上的对比度。

由图 11 可见,当写入光光强为 $2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时,光阀的输出光强已有响应,这比一般文献所报道的 ($3.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) 的光响应阈值灵敏度^[7]要好。

图 12 是一张人物显示照片,它同样是用幻灯片投影在光阀上以后读出的。

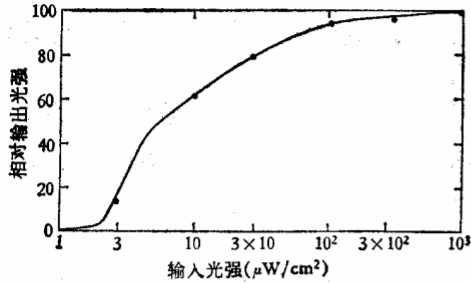


图 11 光阀的输入-输出特性曲线



图 12

3. 光阀的光响应速度

我们用 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$ 的 He-Ne 激光作为写入光, 经扇板调制成方波后照射在光阀的写入面上, 用另一 He-Ne 激光作读出光, 测量了光阀在不同写入光强度下的读出光响应时间。读出光用一快响应的光敏二极管接收, 经负载电阻转换成电压信息后送入示波器, 其结果如表 1 所示。在图 13 中, 我们给出了光强为 $100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 从示波器上拍摄下来的光响应曲线, 照片中横坐标的定标为 $90 \text{ ms}/\text{格}$ 。说明本光阀的光响应时间尤嫌太长。我们认为其原因在于光阀中的液晶层的电光响应时间太长。

表 1

写入光强 ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	25	50	75	100	125	150
上升时间 (ms) 0→90%	160	140	40	30	20	10
下降时间 (ms) 100→10%	320	300	290	280	270	240

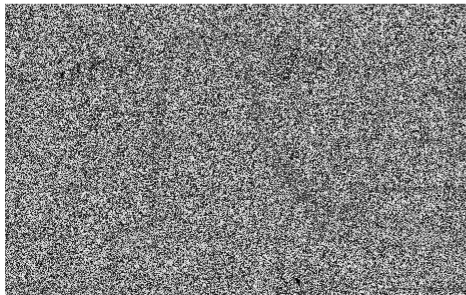
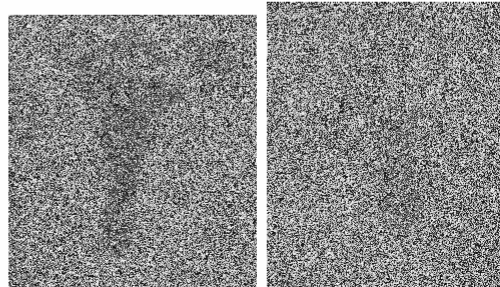


图 13



(a)

(b)

图 14

六、光阀的简单应用及讨论

利用上述自制的交流液晶光阀,已进行了一些信息处理方面的实验. 图 14 给出了用光阀对实物作显示后进行边缘增强处理后得出的照片. 其中(a)为实物显示像, (b)为处理后的像. 它表明本光阀已有一定的实用价值了.

应当指出,本光阀在对有灰阶变化的图像的成像质量、均匀性以及光响应速度等方面还有许多不足,有待今后改进. 另外,由于光阀读出面上的玻璃基片前后表面的干涉,在读出图像上附加了背景噪声,这也需要采取措施予以消除.

黄嘉华同志在整个的光阀研制过程中,在液晶盒和液晶材料的制备方面给予了许多帮助,并进行了合作,谨在此表示深切的谢意.

参 考 文 献

- [1] T. D. Beard *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **22**(1973), 90.
- [2] J. Grinberg *et al.*, *Opt. Eng.*, **14**(1975), 217.
- [3] J. Grinberg *et al.*, *Proc. SPIE.*, **128**(1977), 253.
- [4] A. D. Gara, *Appl. Opt.*, **16**(1977), 149.
- [5] L. M. Fraas *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **47**(1976), 576.
- [6] K. W. Böer, *J. Appl. Phys.*, **37**(1966), 2664.
- [7] E. Marom *et al.*, *Applications of Holography and Optical Data Processing*, (1977), p. 479.

A STUDY ON CdS/CdTe/LIQUID-CRYSTAL NONCOHERENT-COHERENT IMAGE CONVERTER

ZHONG QI-MING ZHAO HUAN-QING JIA YU-RUN ZHANG ZHI-MING

(Department of Physics, Fudan University)

ABSTRACT

The fabrication of an optical image converter composed of CdS/CdTe photo-sensitive heterojunction film and nematic liquid crystal film is investigated. Its performance is described in this paper. The CdS film and the CdTe film is vacuum evaporated under careful monitoring in order to obtain high photo-sensitivity and high electrical reactance. The correlation between the optical and electrical parameters of these composing films and the performance of the device is discussed. It is shown that these properties depend not only on the parameters of each individual film but also on the matching between different films under optimization.