

# 硅上液晶微型显示器工作原理

## Operation Principles of FLCoS Microdisplays

郑文军

Zheng Wenjun

(爱丁堡大学电子电气工程系 英国)

(Department of Electronics &amp; Electrical Engineering, The University of Edinburgh, King's Buildings, Edinburgh EH9 3JF, United Kingdom)

**摘要** 硅上铁电液晶显示器是以 FLCoS 空间光调制器为光引擎的微显示系统,空间光调制器的工作原理与表面稳定型铁电液晶器件相同.硅上铁电液晶微显示器运行时,图像信号被编码后经由空间光调制器加载到光波前,再通过光学系统解码读出,灰度和色彩则可通过时序编码方法来产生.

**关键词** 微显示器 铁电液晶 表面稳定型铁电液晶 硅上铁电液晶

**中图法分类号** TN104.3

**Abstract** Ferroelectric liquid crystal on silicon (FLCoS) is a new type of microdisplay. The core element of the microdisplay is a spatial light modulator made by sandwiching a thin layer of FLC between a piece of cover glass and a silicon backplane which consists of a pixel array with each pixel connected to a driving circuit. The operation of each pixel of the FLCoS spatical light modulator is the same as that of a surface stabilised ferroelectric liquid crystal device. In a FLCoS microdisplay, the image signals can be imprinted onto a wave front by the FLCoS spatial light modulator, and the images can be read out through an optical system. The colour can be created by means of temporal multiplexing.

**Key words** microdisplay, ferroelectric liquid crystal, surface stabilized ferroelectric liquid crystal, ferroelectric liquid crystal on silicon

硅上液晶(LCoS)是以大规模集成电路硅芯片为基板,以液晶为工作媒体的新型器件<sup>[1~3]</sup>.早期,LCoS器件被开发用于光学计算、数据储存及光波前处理等非显示应用领域.由于这种器件具有良好的调光功能,它们在显示器中有着广泛的应用.由于LCoS具有可以借助当代微制作工艺实现微型化的特点,FLCoS在当今移动通讯和信息处理系统日趋小型化和微型化.自以LCoS为光引擎的投影系统样机在1997年被报道<sup>[4~6]</sup>以来,对LCoS的研究及其产品的开发在过去几年中形成了高潮.现在,LCoS已被用于头盔微显示器、近眼显示装置,以及背投电视机中<sup>[7~11]</sup>.

常规的LCoS使用向列态液晶(NLC)为工作媒介.这种器件工艺较成熟,所用材料便宜,制作成本低.但由于NLC对外加电场的响应速度慢(其电光开

关时间在数十毫秒的量级),NLCoS在高质量、高分辨率图像显示中的应用受到限制.

铁电液晶(FLC)是快速响应材料,它们对外加电场的响应速度可达数十微妙的量级,比NLC快了几个数量级,是制作LCoS的优良材料.FLC的电光开关具有双稳态,这一特性加上CMOS集成电路的数码化的本性,使得FLCoS有可能成为全数码化的显示器.此外,FLC器件所需的驱动能量比NLC的更低,而且FLC器件很薄,因而器件的视角要比NLC器件的大.这些优良的特性使得FLCoS在高质量图像显示器中将充当重要的角色.

本文在描述表面稳定型铁电液晶的基础上,对FLCoS微显示器的工作原理作了介绍.文中讨论侧重于液晶器件方面,有关大规模集成电路的知识可参阅相关文献.

# 1 铁电液晶器件工作原理

目前常用的 FLC是扭转倾斜近晶 C ( $Sc^*$ ) 态液晶. 这种液晶的分子呈杆状, 即其纵向线度大于横向线度. 在这种液晶态中, 分子自行组合形成一种层状结构. 在每一分子层内分子相互制约使得它们的长轴倾向于互相平行. 对一个分子层内所有分子的长轴的指向作统计平均即可得到一个指向矢量  $n$ . 这个指向矢量即代表该层分子的指向. 分子指向与层面法线偏离一个角度  $\theta$ .  $\theta$  也被称为  $Sc^*$  态的分子倾斜角. 每一个分子层的指向矢量相对于与之相邻的两个分子层的指向矢分别在相反的方向上转过了一个等量的小角度, 因而形成一种沿分子层的法线方向上扭转的螺旋型结构. 若将一个螺距中分子指向矢量移动到同一个平面上, 它们将组成一个锥面, 该锥面的锥角为分子倾斜角的 2 倍 (参看图 1). 指向矢量在分子层平面上的投影被称为  $c$  矢量. 在一个螺距中  $c$  矢量旋转了  $2\pi$ . 这种螺旋结构造成了分子群对称性的降低, 从而使得在与分子指向和层面法向同时正交的方向上存在非零分子偶极矩. 也就是说, 分子群对称性的降低导致了平行于分子层面的自发极化的产生<sup>[12]</sup>.

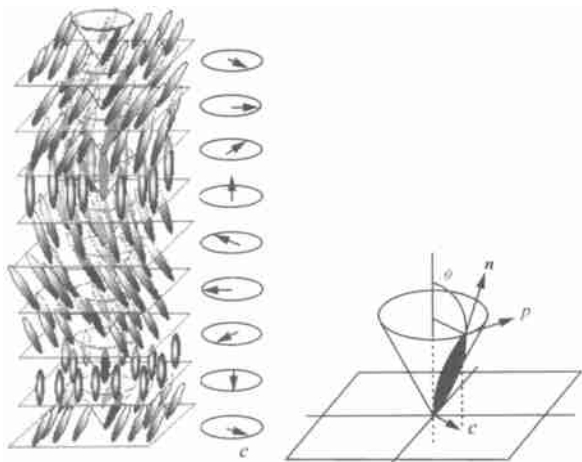


图 1  $Sc^*$  态的分子分层排列

Fig. 1 Molecules are packed in a layer structure in the  $Sc^*$  phase

当一电场施加到 FLC 上时, 电场与分子偶极子耦合产生一力矩, 从而驱动分子在锥面上作旋转运动, 即分子的一端固定在锥顶上, 另一端则沿锥底的圆弧转动. 这种运动即所谓的 Goldstone 模式运动<sup>[13]</sup>.

虽然螺旋近晶态液晶存在铁电性, 但是对於螺旋结构的分子群在一个螺距上作统计平均后分子的自发极化强度互相抵消, 因此宏观上  $Sc^*$  态不显铁电性. 为了利用液晶的铁电性, 必须对  $Sc^*$  态的螺旋结构加以抑制, 并使所有的液晶分子都指向同一方向.

这些要求可通过表面稳定型铁电液晶 (SSFLC)<sup>[14]</sup> 来实现.

SSFLC 器件的结构如图 2 所示. 一薄层 ( $\sim 2\mu m$ ) FLC 被灌入两片蒸镀有氧化锡铟 (ITO) 透明导电层玻璃基板之间做成夹层器件. 在两片玻璃基板的内表面上分别附着上一分子定向层, 用以将分子指向定向到特定的方向上.  $Sc^*$  态的螺旋结构则由基板表面对液晶的作用加以限制. 实验证明, 当 FLC 的厚度远小于螺旋结构的螺距时分子的扭曲将被抑制. 在这种器件中, 分子层垂直于基板表面, 所有分子具有相同的指向, 从而形成所谓的书架结构 (见图 2). 由于表面的约束作用, 液晶分子在垂直于基板表面的外加电场驱动下只能有两个可能的位置. 这两个位置分别对应于外电场在两块基板之间的极性. 在这两个位置上, 分子的极化强度矢量分别与相应的外电场的方向平行, 而分子的指向矢位于分子锥的轴线的两侧, 相互成  $2\theta$  角. 如果分子在定向层表面上不是强锚定, 则在这两个位置上分子的能量状态是简并的. 分子被具有一定极性的电场驱动到两个位置之一后, 将稳定地保持在这个位置上, 即使外电场被撤去也不会改变, 直到施加一个反极性的电场, 分子才会被驱动到另一指向位置. 此即 SSFLC 在电场中分子指向的双稳态效应.

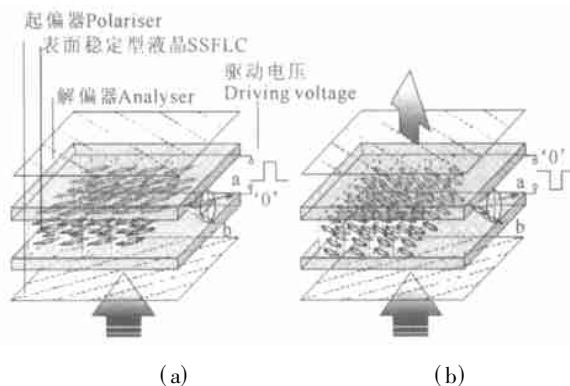


图 2 表面稳定铁电液晶器件示意图

Fig. 2 Showing a SSFLC device

由于液晶是双折射物质, 一层分子定向的 FLC 相当一块单光轴晶片. 一束线偏振光通过这层液晶后产生的相位差为

$$W = \frac{\Delta n d}{\lambda}, \quad (1)$$

式中,  $\Delta n$  为液晶的双折射率,  $d$  为液晶层厚度,  $\lambda$  为入射光波长.

将 SSFLC 器件安置在两片互成正交设置的偏振片之间, 即可制成 FLC 光阀 (见图 2). 经过 FLC 光阀的出射光强可由下式描述<sup>[15]</sup>

$$I = I_0 \sin^2 2h \sin^2 \theta, \quad (2)$$

式中,  $I_0$  为入射光强,  $h$  为分子指向与起偏器的偏振轴

的夹角. 如果 SSFLC 器件的安置使得分子的两个可能指向之一与起偏器的偏振轴平行, 即  $H=0$ , 故  $I=0$ , 显示表面因无光透出而呈黑暗态, 此即器件的暗态. 改变电场的极性, 分子将被外加电场驱动到另外一个可能位置上. 这时,  $H=\pi$ , 于是出射光为一椭圆偏振光, 故部分光将透过检偏器而显示表面呈明亮态, 此即器件的亮态. 对于一束具有一定波长入射光, 如果适当控制  $d$ , 使得  $W=\pi/2$ , 即使得 FLC 薄层成为一半波片; 并选用适当的 FLC, 使得分子倾斜角满足  $\theta=\pi/4$ , 即  $\theta=22.5^\circ$ . 则出射光强可达到最大. 由于分子指向在电场中具有双稳态的特性, 因而 SSFLC 的两个光学状态, 即“亮态”和“暗态”, 也是稳定的. 这种在电场中所具有的两个稳定的光学状态的特性即为 SSFLC 的电光双稳态特性.

衡量 FLC 器件质量的一个重要指标是其在电场驱动下的开关速度, 通常用响应时间来表示. 工程上, SSFLC 器件的响应时间  $\tau$  由实验测出, 可用下面的经验公式来描述<sup>[16]</sup>

$$\tau = \frac{1.8V_h}{P_s \cdot E}, \quad (3)$$

式中,  $E$  为外加电场强度,  $P_s$  为 FLC 的自发极化强度,  $V_h$  为旋转粘滞度. 近 30 年来, 很多具有优良的电光开关性能的 FLC 已被开发出来. 表 1 依开关速度为指标列出了一些厂家的典型产品. 这些产品的开关时间都不超过  $50\mu s$ , 是用于快速 FLC 器件的良好材料.

表 1 典型快速开关 FLC 材料

Table 1 Typical fast switching FLCs

生产厂家 Manufacturer	产品名称 Product Code	开关速度 Switching Speed	膜层厚度 Thickness	测试环境 温度 Testing Temperature
		( $\mu s$ )	( $\mu m$ )	( $^\circ C$ )
Chisso Cop. <sup>[17]</sup>	CS1024	25	2	25
	CS1031	37	2	20
E Merck <sup>[18]</sup>	SCE13	50	2	25
	ZLI 40003	20	2	25
Displaytech <sup>[19]</sup>	DI 2000	20	2	25
* E Merck <sup>[18]</sup>	E11	10	~ 6	25

\* 作为比较而列入的 NLC. A NLC listed as a comparison.

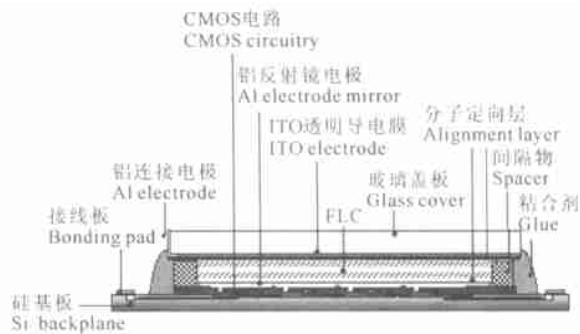
## 2 硅上铁电液晶空间光调制器

空间光调制器是一种可以通过对光波的振幅、强度、相位、偏振态、或频率进行调制, 从而把信息以空间的方式加载到光波前的器件. 空间光调制器可分为两种类型: 光驱动型和电场驱动型. FLCoS 是电场驱动型空间光调制器. 它们通过电场驱动的方式对通过其中的光波的相位、偏振态进行调制, 并以反射的方式将载有信息的光波送出, 供后续系统进行处理.

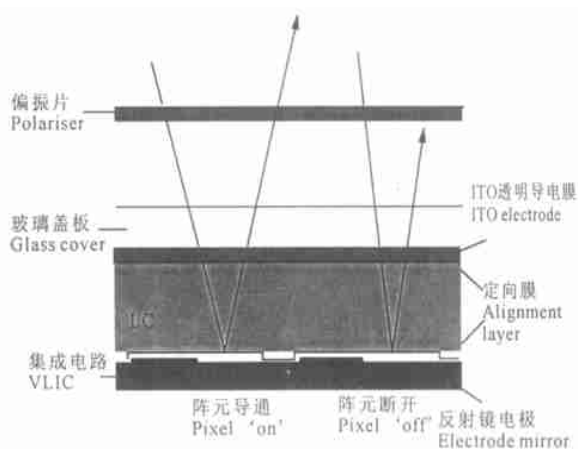
### 2.1 FLCoS 空间光调制器的结构和工作原理

FLCoS 空间光调制器的结构如图 3 所示. 结构上, FLCoS 与 SSFLC 器件相似, 也是把一薄层 FLC 夹在两块基板之间; 对分子的指向和消螺旋的要求也与 SSFLC 的一样. 不同的是, 其中一块基板由一块大规模集成电路硅芯片取代. 硅基板上包含有一个像素阵列, 其中的每一个像素都含有一个存储器. 该存储器输出端与一块铝片连接. 铝片的尺寸一般在  $10^4 m \times 10^4 m$  的量级. 这个微型铝片有双重功能: 它既是一个用来驱动液晶的电极, 又是一面反射镜, 用以把进入 FLCoS 的光反射出来.

实际上, 这个像素阵列的每一个阵列元就是一个微型 SSFLC 光阀. 在电场的驱动下, 每一个像素元都象 SSFLC 光阀一样可以导通或阻断光波的传播. 对像素阵列进行适当的编码, 即可实现图形或图像 displays.



(a)



(b)

图 3 (a) FLCoS 空间光调制器的结构及 (b) 其调光原理示意图

Fig. 3 Schematically showing (a) the structure, and (b) the principle of the light modulation of the FLCoS spatial light modulator

### 2.2 SRAM 型像素元及其运行<sup>[20, 21]</sup>

FLCoS 的像素元依其电路的种类可有 2 种基本类型: 动态随机存取存储器 (DRAM) 型和静态随机

存取存储器 (SRAM) 型. 在 FLCoS 中多采用 SRAM 类型硅基板. 这里仅描述 SRAM 型像素元的电路, 有关 DRAM 电路的特征可参阅参考文献 [20].

SRAM 型像素元的结构如图 4 所示, 是由一个 SRAM 寄存器和一个异或门 (XOR) 组成. 数据信号储存在 SRAM 寄存器里. 寄存器的输出端与 XOR 的输入端连接. XOR 的另一个输入端接时钟信号. 从 XOR 出来的信号输到反射镜电极上. 时钟信号同时与公共电极 (玻璃盖板的透明电极) 连接. 这样, 镜面电极的电位将依寄存器中储存的信号是逻辑 '0' 或逻辑 '1', 而与公共电极同相或反相. SRAM 的这种特性对 FLC 器件非常有益. 为防止应空间电荷积累而引起的 FLC 的化学性质蜕变, 必须保持 FLC 层内的电荷平衡. 因此, 当给 FLC 输入一个电脉冲后, 应输入一个具有相等幅值相等宽度而极性相反的脉冲. 使用 XOR 门电路, 只要把时钟信号的工作周期调节为 50%, 即可方便实现 FLC 层内电荷平衡. 由于 SRAM 的逻辑运行本质上是数码式的, 而 FLC 的电光双稳态特性也具有类似的逻辑运行功能. 因而 FLC 能与 SRAM 很好地耦合, 从而为制作全数码化显示器奠定了基础.

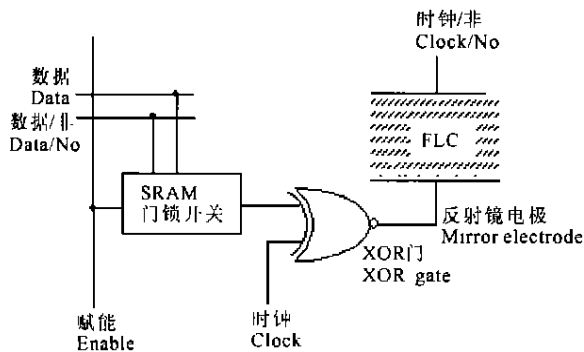


图 4 SRAM 电路示意图

Fig. 4 Schematic of the SRAM circuitry

SRAM 型像素阵列的运行可被描述如下:

设想在一帧图像期间, 一个逻辑 '1' 被存在像素寄存器中. 在一个时钟周期中, 前半周期使 XOR 的输出为 '0', 此时像素得到一个正电压, 因而像素为 '亮' 态; 在后半周期中, XOR 输出 '1', 此时像素得一负电压, 因而像素为 '暗' 态. 因为时钟的工作周期为 50%, 像素有一半时间处于反射态, 即 '亮' 态; 而另一半时间则处于非反射态, 即 '暗' 态. 在一个周期内, 电荷是平衡的. 现在设想在一帧图像期间, 像素寄存器存了一个逻辑 '0' 的情形. 在一个时钟周期内, 由于镜面电极与玻璃盖板电极同相, 在 FLC 层上将没有电压差. 所以像素将维持被上一个帧幅所驱动到的状态. 这个周期中, FLC 层的电荷仍然是平衡的.

SRAM 像素工作的逻辑状态列在表 2 内.

表 2 SRAM 的逻辑数值及 FLCoS 空间光调制器的响应

Table 2 Truth table and optical response of the FLC layer for the SRAM pixel

输入到 XOR 门的信号 Inputs to XOR gate		镜面电极逻辑状态 Logical state of electrode mirror	前置电极逻辑状态 Logical state of front electrode	FLC 层的电压差 Voltage on FLC layer	FLC 的光学响应 Optical response of FLC
门锁 Latch	时钟 Clock				
0	0	0	0	0	关断 Off
0	1	1	1	0	关断 Off
1	0	1	0	-V <sub>DD</sub>	关断 Off
1	1	0	1	+V <sub>DD</sub>	导通 On

### 3 硅上铁电液晶微显示器系统

FLCoS 微显示器是以 FLCoS 空间光调制器为光引擎的微显示系统. 它包含 FLCoS 空间光调制器、光学系统、电子编码和解码等系统. 根据图像的性质, LCoS 微显示器可分为两大类:

(I) 投影系统. 包括前投投影仪和背投系统. 投影系统显示的是实像.

(II) 直视系统. 常见的是装置在数码相机、手提录像机和头盔显示系统中的监视器. 该系统为观察者提供一个放大的虚像.

#### 3.1 图像显示机理

直视 FLCoS 微显示器一般由 FLCoS 光引擎、编码驱动装置、光学系统 (包括光源和成像系统) 等几个部分组成. 由光源发出的光经光学系统调整后投射到 FLCoS 空间光调制器上. 图像信号经编码后由空间光调制器加到入射光上. 加载的信号被检出后经光学系统成像放大, 传送给观察者.

在 FLCoS 微显示器系统中, 首先将每帧图像分解为数帧子图像, 然后色彩图像和灰度图像可通过空间或时间再合成的方式产生. 对于 FLCoS 器件, 电荷平衡的问题必须考虑在内. 如上节所述, 为实现电荷平衡, 每输入一帧图像信号, 应接着输入一帧平衡补偿信号. 但这帧补偿信号不能被显示, 否则将有损于图像显示的质量. 技术上, 可利用光源的频闪来将这帧补偿图像隐去. 当图像帧输入时, 让光源开启, 使图像被显示出来; 而当补偿信号帧输入时, 将光源关断, 故无可见图像输出. 在快速闪烁时, 人的视觉无法感觉到这种图像帧和补偿帧之间的切换间断, 而所看到的是连续运动的图像.

#### 3.2 FLCoS 显示器的图像显示帧频

显示器在单位时间内所能显示的图像帧幅的数目, 即帧频, 对图像显示的质量起着非常重要的作用.

一般帧频越高,图像的清晰度也越高.数学上,帧频是显示一帧图像所需时间的倒数.FLCoS空间光调制器的驱动一般是以列扫描的方式,将数据通过总线输入硅基板.FLCoS微显示器显示一帧图像所耗的时间由下述几个因素决定:

(I) 每个像素元中的液晶要达到一定的开关状态需要一定的时间.这个时间称为驻留时间.对于一定的液晶材料,驻留时间即为响应时间  $\tau$ ,由公式(3)决定;

(II) 将整幅数据全部输入到一个  $M \times N$  阵列中所需的时间为  $t_E$ .对于列扫描方式,  $t_E = N t_i$ ;

(III) 在液晶达到开关状态后,为使观察者看到稳定的图案,该状态必须维持一段时间  $t_{FLC}$ ;

(IV) 为调整帧频而附加的时间  $t_{EX}$ .

所以,输入一帧图形所需的驱动时间  $t_d$  数值为  $t_d = t_E + t_{FLC} + t_{EX}$ , (4)

为达到电荷平衡,必须输入一帧与所要显示的图形相同而电压极性相反的信号.我们称这帧信号为补偿信号,其施加的时间与  $t_d$  相等,称为平衡延迟时间  $t_b$ .于是,FLCoS的扫描帧频为

$$f_{CK} = 1/[2(t_d + t_b)] = 1/[2(t_E + t_{FLC} + t_{EX})]. \quad (5)$$

当  $t_{EX}$  为零时,帧频达到最大

$$f_{CKM} = 1/[2(t_E + t_{FLC})], \quad (6)$$

选用快速响应的 FLC 可以提高 FLCoS 器件的帧频.

### 3.3 灰度的实现

在 FLCoS 微显示器中,灰度可通过多元驱动再合成技术来实现.合成的方式有 2 种:空间合成方式和时间序列方式.

在空间合成方式中,一个像素由一定数目的子像素组成.像素的灰度通过控制具有一定光学状态的子像素的数目来实现.像素中这些子像素的大小不是等同的.各子像素所含的基本像素元的数目为 2 倍数的关系.例如,为获得一个 8 个等级的灰度,一个像素必须有 3 个子像素,各子像素的基本像素元的数目分别为 1, 2, 4, 而总共需要 8 个基本像素元;而要实现 16 等级的灰度,每一个像素则需要 4 个子像素,所含基本像素元数目分别为 1, 2, 4, 8, 共 16 个基本像素元(图 5).一般,在这种技术里,像素的灰度等级数  $H$  与子像素的数目  $S$  之间的关系为

$$H = 2^S, \quad (7)$$

而基本像素元的总数为

$$n = \sum_{i=0}^{S-1} 2^i, \quad (8)$$

在运行中,灰度的等级由一定数目的亮态和暗

态基本像素元的组合决定.空间合成方式的缺点是占用的空间大,降低了器件的分辨率.例如,为实现  $H$  级的灰度,一个  $N \times M$  像素阵列将被分解为  $g_1 \times g_2$  个含有相等数目的基本像素的分阵列.每个分像素所含的基本像素为

$$h_1 \times h_2 = \sum_{i=0}^{S-1} 2^i, \quad (9)$$

式中,  $S$  由公式(8)得出.这样,可分辨的像素阵列变成  $(N/h_1) \times (M/h_2)$ , 分辨率下降了  $1/(h_1 h_2)$  倍.

在时序合成方式中,是把一个图像分解成一系列子像幅.每帧子像幅对应一帧经适当编程生成的比特面.然后,把一系列子像幅按一定的时间序列扫描到 FLCoS 空间光调制器上,并在探测平面上对一定数目的子像幅进行累加即可得到一定的灰度.在显示器的情形下,这种累加一般由人眼完成.这种以线性累加来产生灰度的方法在灰度级较少的情形下效果很好.但每增加一级灰度就需要增加一帧比特面,这在灰度级较大的情况下就不实用了.一更有效的方法是在时序合成方式中结合使用脉冲光源.使用这种技术,只需增加一帧比特面即可使灰度级增加一倍.图 6 展示了由比特面结合脉冲光源通过时间驱动方式产生的 16 灰度的模型.这种灰度产生方式更容易与数码化驱动匹配,因而为 FLCoS 微显示器采用.

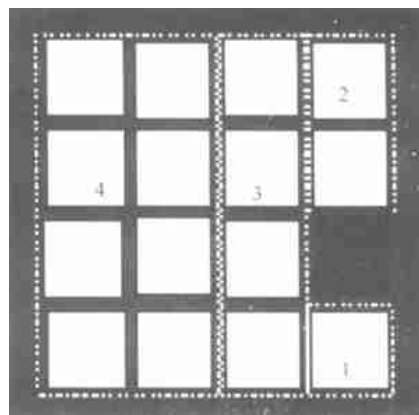


图 5 一个 16 级灰度像素元的子像素空间分布示意图

Fig. 5 Schematically showing the spatial distribution of the sub-pixel of a pixel with 16 grey levels

### 3.4 色彩的产生

在普通的显示器中,各种颜色是通过三基色(红、绿、蓝)在空间上进行混合来产生的.在微显示器中,色彩则是通过时序驱动方式来合成产生.这种方法是把一彩色图像分解成一系列单色的子图像并转换为适当编码的比特面,然后按一定的时间序列扫描到 FLCoS 空间光调制器上,并与脉冲单色光配合.当一帧红的比特面被扫描到 FLCoS 空间光调制器上时,同时向这个比特面闪烁红光.用同样的方法,建立

起绿色和蓝色的单色子像幅面,然后将一定数目的这些单色子像幅累加起来组成具有所需色彩的画面。

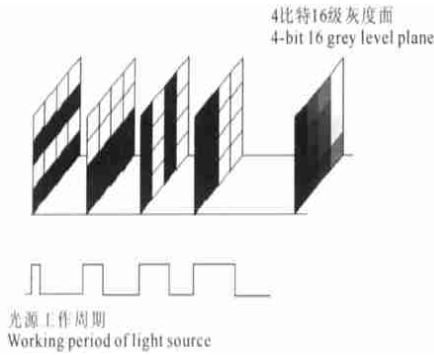


图 6 由比特面结合脉冲光源通过时间驱动方式而产生的 16 级灰度图

Fig. 6 Schematic of binary encoded bit-planes combined with pulsed light source to generate 16 grey levels in temporal multiplexing scheme

### 3.5 光学系统

微显示器的光学系统可包含两个部分:光源准直和成像系统.由于微显示器的容许空间小,光学系统必须小巧紧凑.这里“小巧紧凑”的意思指体积要小、重量要轻.为达此要求,必须使微显示器的光学系统中各光学部件尽量兼顾多重功能.图 7 展示一种实用的微显示器光学系统.由光源发出的光经准直后转换为平行光,并由起偏器调制成线偏振光.这束平行线偏振光通过分束器时,一半被反射掉,而另外的一半则被投射到 FLCoS 空间光调制器上,图像信号经编码后经由空间光调制器加到入射光束上.带有信号的光束被反射镜反射再次进入分束器.出射光强的一半又被反射掉,余下的光改变传输方向前往光学成像系统.出射光所载的信号被检偏器检出后送到光学系统成像放大,然后传送给观察者。

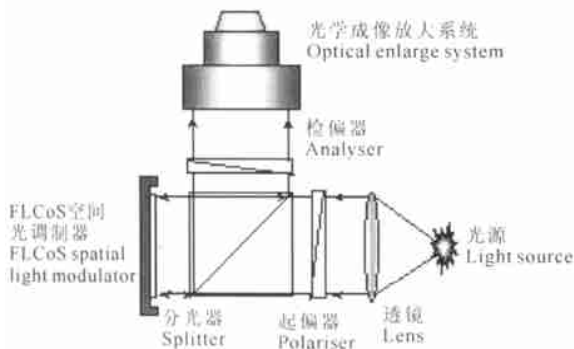


图 7 用于 FLCoS 微显示器的光学系统示意图

Fig. 7 Schematic of an optical system used in FLCoS microdisplay

## 4 结束语

本文介绍了 FLCoS 微显示器的基本工作原理。

FLCoS 微显示器的核心部分是 FLCoS 空间光调制器.这种器件以快速响应的 FLC 材料为工作媒体,其构造则是一个含有一块大规模集成电路硅芯片的 SSFLC 器件.显示器的基板电路多为 SRAM 型,它的每个像素元含有一个 SRAM 器件和一块反射镜电极.使用 SRAM 型基板可使 FLC 体内电荷得到更好地平衡.FLCoS 微显示器是通过多元驱动时间序列合成方式来获得灰度和色彩.作为微显示器的重要组成部分,光学系统的地位不容忽视.微显示器的光学系统的设计的总原则是:在成像清晰的前提下,必须小巧紧凑,即体积要小、重量要轻。

由于 FLC 的开关速度大大优于传统的向列态液晶,且具有双稳态开关的特性,这使得 FLCoS 在微显示器中的应用较向列态液晶器件具有更大的潜在优势.FLCoS 可能是未来高质量数码化显示器的最佳候选器件。

### 参考文献

- 1 Underwood I, Vass D G, Sillitto R M. Evaluation of an nMOS VLSI array for an adaptive liquid-crystal spatial light modulator. IEE Proc, 1986, 133: 77~ 82.
- 2 Cotter L K, Drabik T J, Dillon R J, et al. Ferroelectric-liquid-crystal/silicon-integrated-circuit spatial light modulator. Opt Lett, 1989, 15: 291~ 293.
- 3 Underwood I, Vass D G, Sillitto R M, et al. A high performance spatial light modulator. SPIE, 1991, 1562: 107 ~ 115.
- 4 Sato F, Yagi Y, Hnihara H. High resolution and bright LCD projector with reflective LCD panels. SID Intl Symp Digest Tech Papers, 1997: 997~ 1000.
- 5 Alt P M. Single-Crystal silicon for high resolution displays. Conf Record of the Intl Display Research Conf, 1997, 19~ 28.
- 6 Melcher R L, et al. Design and fabrication of a prototype projection data monitor with high information content. IBM J R & D, 1998, 42(3/4): 321~ 338.
- 7 Jepsen M L, Ammer M J, Bolotski M, et al. High resolution LCOS microdisplay for single double or triple-panel projection systems. Displays, 2002, 23: 109~ 114.
- 8 Smet H, Cuypers D, Calster A, et al. Design, fabrication and evaluation of a high-performance XGA VAN-LCOS microdisplay. Displays, 2002, 23: 89~ 98.
- 9 Waldkirch M von, Lukowicz P, Tröster G. LCD-based coherent wearable projection display for quasi-accommodation-free imaging. Opt Comm, 2003, 217: 133~ 140.
- 10 Schuck M, Mcknight D, Johnson K M. SID97 Digest, 1997, 28: 293.
- 11 Shimizu. SID2001 Digest, 2001, 32: 1072.

- 12 Meyer R B. Ferroelectric liquid crystals a review. *Mol Cryst Liq Cryst*, 1977, 40 747~ 762.
- 13 Schonfeld A, Kremer F, Zentel R. Collective and molecular dynamics in low molar mass and polymeric ferroelectric liquid crystals. *Liq Cryst*, 1993, 13 403~ 412.
- 14 Clark N A, Lagerwall S T. Submicrosecond bistable electrooptic switching in liquid crystals. *Appl Phys Lett*, 1980, 36 899~ 901.
- 15 Pagano-Stauffer L A, Johnston K M, Clark N, et al. Optical logic gates using ferroelectric liquid crystals. *SPIE Proc*, 1986, 684 88~ 95.
- 16 Xue J, Handshchy M A, Clark N A. Electrooptic response during switching of a ferroelectric liquid crystal cell with uniform director orientation. *Ferroelec*, 1987, 73 305~ 314.
- 17 Chisso Cop. [Http //www.chisso.co.jp](http://www.chisso.co.jp).
- 18 E Merch. [Http //pb.merck.de](http://pb.merck.de).
- 19 Displayteeh. [Http //www.displayteeh.com](http://www.displayteeh.com).
- 20 Burns D C. Design and characterization of a ferroelectric liquid crystal over silicon spatial light modulator, PhD Thesis, Edinburgh Edinburgh Univeristy, 1994.
- 21 Burns D C, Gourlay J, O'hara A, et al. A 256\* 256 SRAM-XOR pixel ferroelectric liquid crystal over silicon spatial light modulator. *Opt Comms*, 1995, 119 623~ 632.

(责任编辑:黎贞崇)

(上接第 29页 Continue from page 29)

- 13 Zhang H, Zhang B W. Prediction of binary transition-transition metal amorphous alloys by mechanical alloying. *Physica B*, 1995, 205 263~ 268.
- 14 Alonso A J, Gallego L J, Lopez J M. Glass formation in binary alloy systems a prediction of the composition range. *Phil Mag A*, 1988, A58 79~ 92.
- 15 Liou S H, Chien C L. Composition range of binary amorphous alloys. *Phys Rev B*, 1987, 35 2443~ 2446.
- 16 Egami T, Aur S. Local atomic structure of amorphous and crystalline alloys computer simulation. *J Non-crystalline Solids*, 1987, 89 60~ 74.
- 17 Zhang B W, Xie H W, Liao S Z. Amorphous forming ability in the ternary Cu-Sn-P system by mechanical alloying. *J Mater Proc Tech*, 1999, 89~ 90 378~ 384.
- 18 Takeuchi A, Inoue A. *Mater Trans JIM*, 2000, 41 1372.
- 19 Toop G W. *Trans Met Soc. AIME*, 1965, 233 850.
- 20 De Boer F R, Boom R, Mattens W C M, et al. *Cohesion in metals*. Amsterdam: North-Holland. 1988.
- 21 Frey M A, Gignoux D, Lienard A. Onset of 3d magnetism in the Ce-Ni amorphous alloys. *J MMM*, 1984, 44 263~ 268.
- 22 Yavari A R, Rouault A. New amorphous Ce<sub>5</sub>Ni<sub>55</sub> and the use of metallic glass-forming criteria. *J Phys F Met Phys*, 1986, 16 687~ 691.
- 23 Wastin F, Sumiyama K, Hihara T, et al. Influence of the synthesis mode on electronic properties of Ce-Ni amorphous alloys. *Physica B*, 1992, 186~ 188 563~ 565.
- 24 Inoue A, Ohtera K, Kita K, et al. New amorphous Mg-Ce-Ni alloys with high strength and good ductility. *Jpn J Appl Phys Lett*, 1988, 27 2248~ 2251.
- 25 Zhang S G, Hara Y, Suda S, et al. Physicochemical and electrochemical hydriding-dehydriding characteristics of amorphous MgNi<sub>x</sub> (x = 1.0, 1.5, 2.0) alloys prepared by mechanical alloying. *J Solid State Electrochem*, 2001, 5 23 ~ 28.
- 26 Ong M S, Li Y, Blackwood, D J, et al. The influence of heat treatment on the corrosion behaviour of amorphous melt-spun binary Mg-18 at.% Ni and Mg-21 at.% Cu alloy. *Mater Sci Eng A*, 2001, A304~ 306 510~ 514.
- 27 Liu W H, Wu H Q, Lei Y Q, et al. Amorphization and electrochemical hydrogen storage properties of mechanical alloyed Mg-Ni. *J Alloys Compd*, 1997, 252 234~ 237.
- 28 Saxena N S, Pratap A, Bhandari D, et al. In *Physics of Non-crystalline Solids*, L D Pye, W C La Course, H J Stevens. eds. London: Taylor & Francis, 1992 106~ 111.
- 29 Spassov T, Koster U J. Hydrogenation of amorphous and nanocrystalline Mg-based alloys. *Alloys Compd*, 1999, 287 243.
- 30 Brodova I G, Manukhin A B, Bykov A S. *Phys Met Metall*, 1998, 85 355.
- 31 Sommer F, Fripan M, Predel B. *Proc 4th Int con Rapidly Quenched Metals*, T Masumoto, K Suzuki. eds. Jpn Inst Metals Sendai, 1981, 209.
- 32 Chen H M, Zhong X P, Ouyang Y F. Composition range of amorphous Mg-Ni-Y alloys. *J Rare Earths*, 2003, 21 568.

(责任编辑:黎贞崇)