

文章编号 1004-924X(2009)08-1790-08

交叉效应对光栅光调制器阵列的影响

金 珠,温志渝,张智海,黄尚廉

- (1. 重庆大学 新型纳米器件与系统技术国家重点学科实验室,重庆 400044;
2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

摘要:为了讨论交叉效应对无源矩阵驱动的光栅光调制器的影响,建立了无源矩阵驱动光栅光调制器的电学模型。介绍了光栅光调制器的工作原理和驱动电压。利用基尔霍夫的电流定理和电压定理,对该无源矩阵驱动阵列的电学模型进行化简分析,得到了交叉效应中半选点像素、非选点像素与全选点像素之间的电压关系。实验测得器件的驱动电压,并对加工的阵列器件进行交叉效应验证,得到这 3 种像素的 ± 1 级衍射光强与全选点像素驱动电压的关系。最后,提出两种抑制交叉效应的方法。实验结果显示:光栅光调制器的工作电压为 8 V,吸合电压约 8.5 V 时;对于加工的 16×16 阵列,半选点像素电压约为全选点像素电压的 $1/2$,且远大于非选点像素电压,结论与交叉效应理论分析一致。结果表明:交叉效应会降低阵列的光学对比度和光利用率,而器件较低的驱动电压有利于与有源矩阵电路实现单片集成,消除器件的交叉效应。

关键词:微机电系统;光栅光调制器;交叉效应;无源矩阵驱动

中图分类号:TN256;TN761 **文献标识码:**A

Influence of crosstalk effect on grating light modulator array

JIN Zhu, WEN Zhi-yu, ZHANG Zhi-hai, HUANG Shang-lian

- (1. *Key Discipline Laboratory of New Micro/Nano Devices and Systems, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*
2. *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)*

Abstract: In order to discuss the influence of the crosstalk effect on a Grating Light Modulator (GLM) driven by a passive matrix, an electrical model of the GLM array addressed by the passive matrix is established. The operation principle and the driving voltage of the GLM are presented, and the electrical model is analyzed and simplified according to the Kirchhoff's Current Law (KCL) and Kirchhoff's Voltage Law (KVL). The voltage relationships among the half-selected pixel, non-selected pixel and the all-selected pixel are obtained. Then, the operating voltage and the pull-in voltage of the GLM are measured by an experiment and the crosstalk effect is validated by another experiment, so that the relationship between the ± 1 order diffractive intensity of those three kinds of pixels and the driving voltages of all-selected pixels is gained. Finally, two methods for restraining the crosstalk effect are

收稿日期:2008-08-04;修订日期:2008-10-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60708017);重庆市院士基金资助项目(No. CSTC, 2008BC3002)

proposed. The experiment shows that the operating voltage and the pull-in voltage of the GLM are 8.0 V and 8.5 V respectively. It also indicates that the voltage of half-selected pixel is approximately half of the all-selected pixel, and is much larger than that of the non-selected pixel, which is consistent with the theory of crosstalk effect. These results illustrate that the crosstalk effect can reduce the contrast ratio and light utilization of the GLM, but selecting a lower driving voltage can realize the monolithic integration of the GLM and the active matrix and can eliminate the crosstalk effect.

Key words: MEMS; Grating Light Modulator(GLM); crosstalk effect; passive matrix addressing

1 引 言

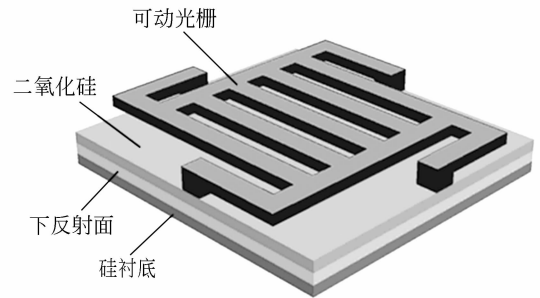
近年来,投影显示器件正向多元化方向发展,基于 MEMS 技术的投影显示器件已成为世界各国研究的热点,并以其优异的性能成为带动下一代显示产业发展的一个重要分支。在这类 MEMS 器件中,较典型的当数数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)^[1]和光栅光阀(Grating Light Valve, GLV)^[2]。DMD 器件利用了反射原理,对比度高、光利用率大,能够形成无缝面阵;但是 DMD 存在结构复杂,加工难度很大,成品率低等不足。GLV 利用衍射原理,具有响应速度快、加工简单、对比度高等优点;但不能形成面阵,其线阵结构要求加入扫描器件来完成图像显示,增大了器件成本。最近,重庆大学提出了一种双层结构的光栅光调制器^[3-4],其加工较 DMD 简单,同时解决了 GLV 难于形成面阵的缺点,具有良好的应用前景。

光栅光调制器阵列采用的是纵横交错的无源矩阵寻址方式。这种驱动方式简单,有利于对器件的结构和参数进行优化改进。光栅光调制器阵列的驱动是影响器件性能的关键技术,因此,详细分析无源矩阵驱动阵列的特性以改善和提高调制器的工作性能很有必要。本文介绍了光栅光调制器的工作原理,建立无源矩阵驱动的光栅光调制器的模型,并详细地分析了阵列的交叉效应原理,通过实验对阵列的交叉效应进行了验证。最后,提出抑制阵列交叉效应的方法。

2 光栅光调制器的工作原理

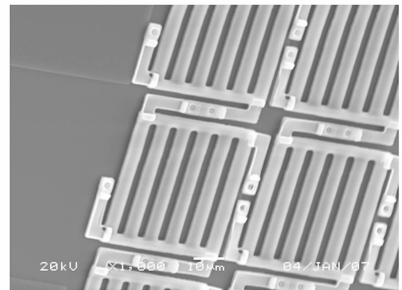
光栅光调制器的结构,如图 1 所示,它由硅衬底、下反射面、二氧化硅和可动光栅组成。其中,可动光栅(上电极)和下反射面(下电极)为铝膜材

料,二氧化硅为两层铝膜之间的绝缘层。光栅光调制器的可动光栅和下反射面组成一个相位光栅,可动光栅和下反射面的间距为 h 。



(a) 单个光栅光调制器示意图

(a) Sketch of a single GLM



(b) 加工的光栅光调制器阵列 SEM 图片

(b) SEM photograph of fabricated GLM array

图 1 光栅光调制器结构

Fig. 1 GLM structure

对可动光栅和下反射面未施加电压时,可动光栅初始位置为 $h = n\lambda/2$ (n 为正整数, λ 为入射光的波长),衍射光强主要集中在 0 级。对可动光栅和下反射面施加某个电压时,由于静电力作用,可动光栅向下平动,此时 $h = (2n+1)\lambda/4$,衍射光强主要集中在 ± 1 级。因此,如果在可动光栅和下反射面上外加一个驱动电压,通过静电力改变可动光栅和下反射面之间的距离,就可以实现对光的调制。

光栅光调制器可等效为由可动光栅与下反射面组成的平板电容器,其驱动电压 V_0 为^[5]:

$$V_0 = (d_0 + \frac{d_1}{\epsilon_1} - y) \sqrt{\frac{2Ky}{\epsilon\epsilon_0\gamma a(NW + 2L)}} \quad (1)$$

式中 K 为系统的等效弹性系数, a 为可动光栅的条宽, d_0 为上极板和绝缘层之间的初始距离, d_1 为绝缘层厚度, y 为可动光栅下拉距离, γ 为修正因子。

器件的电容 C_g 为^[5]:

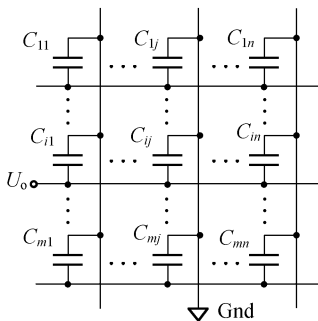
$$C_g = \frac{\epsilon\epsilon_0 a(NW + 2L)}{h} \left[1 + \frac{h}{\pi a} + \frac{h}{\pi a} \ln\left(\frac{2\pi a}{h}\right) + \frac{h}{\pi a} \ln\left(1 + \frac{2t}{h} + 2\sqrt{\frac{t}{h} + \frac{t^2}{h^2}}\right) \right] \quad (2)$$

t 为可动光栅的条宽, N 为光栅条数, h 为上下电极的等效间距, L, W 分别代表单个器件的长度和宽度。确定光栅光调制器的各个参数大小, 然后根据公式(1)和(2), 可以确定器件的 V_0 和 C_g 的大小。

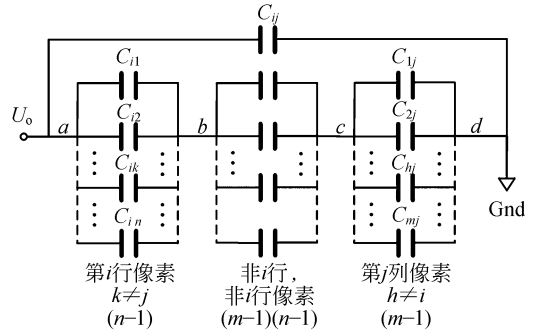
3 交叉效应的原理分析

光栅光调制器阵列采用无源矩阵驱动的逐行扫描方式。无源矩阵由水平电极组和垂直电极组所构成。每一行所有光栅光调制器的下电极相连接作为一水平电极, 每一列所有光栅光调制器的上电极相连接作为一垂直电极。水平电极产生行选通的脉冲信号, 垂直电极用于传输灰度数据信号。所有行依次被扫描一遍, 则阵列显示一帧图像。

在 m 行 n 列光栅光调制器阵列中, 对第 i 行第 j 列交叉点的像素施加电压 U_0 , 这个被施加电压的像素称为全选点像素, 如图 2(a)。在第 i 行



(a) 阵列原始模型
(a) Original model



(b) 阵列化简模型
(b) Simplified model

图 2 $m \times n$ 阵列光栅光调制器电学模型

Fig. 2 Electrical models of $m \times n$ GLM array

和第 j 列像素中, 除全选点像素以外的所有像素称为半选点像素。阵列中除全选点像素和半选点像素以外的其他像素称为非选点像素。在理想情况下, 对全选点像素施加电压时, 阵列中的半选点像素和非选点像素的电压为 0。但实际上, 阵列器件由于矩阵电容的耦合效应, 会导致半选点像素和非选点像素产生耦合电压。

假设所有像素电容初始电压均为 0。利用基尔霍夫电流定理(KCL)和基尔霍夫电压定理(KVL)^[8], 通过分析、计算, 然后对图 2(a) 进行化简, 最终得到图 2(b)。根据串并联电容的电压关系, 计算得到:

$$\begin{cases} U_{bc}(t) = \frac{C_{ab}}{C_{bc}} U_{ab}(t) \\ U_{cd}(t) = \frac{C_{ab}}{C_{cd}} U_{ab}(t) \end{cases} \quad (3)$$

由于光栅光调制器阵列中每个像素是一样的, 故每个光栅光调制器的电容值相等, 则各个端点之间的电容大小为:

$$\begin{cases} C_{ab} = (n-1) \cdot C_g \\ C_{bc} = (m-1) \cdot (n-1) \cdot C_g \\ C_{cd} = (n-1) \cdot C_g \end{cases} \quad (4)$$

根据各个端点之间的电压之和等于 U_0 :

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{cd} = U_0 \quad (5)$$

将公式(3)和(4)带入(5), 计算得到:

全选点像素所在行的半选点像素的电压为:

$$U_{ab} = \frac{m-1}{m+n-1} U_0 \quad (6)$$

全选点像素所在列的半选点像素的电压为:

$$U_{cd} = \frac{n-1}{m+n-1} U_0 \quad (7)$$

非选点像素的电压为:

$$U_{ix} = \frac{1}{m+n-1} U_0. \quad (8)$$

从上面公式(6)、(7)和(8),分析得出:(1)半选点像素电压小于全选点像素电压,但远大于非选点像素电压;对于 16×16 的光栅光调制器阵列,半选点像素电压、非选点像素电压分别等于全选点像素电压的 $15/31$ (约为 $1/2$)和 $1/31$ 。(2)全选点像素电压不变时,随着光栅光调制器阵列的不断增大,半选点像素的电压越来越大,而非选点像素电压越来越小,这样导致交叉效应更加严重。

前面分析了单个像素施加电压时,对阵列中其他像素电压的影响。光栅光调制器阵列进行逐行扫描,对选通行中的多个像素施加电压的情况,可以利用与前述相似的方法进行分析。该分析得到的半选点像素和非选点像素的电压可能和前面的分析结果不同,但交叉效应会更加明显。

4 交叉效应实验

由于在光栅光调制器阵列中,单个像素较小($52 \mu\text{m} \times 52 \mu\text{m}$),同时考虑到阵列特殊的布线方式,很难对其单个像素进行电压检测。为了验证交叉效应的存在,并检测出半选点像素、非选点像素与全选点像素之间的电压关系,搭建了实验装置,如图3所示。

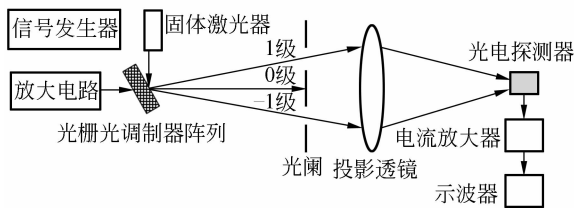


图3 交叉效应验证实验平台

Fig. 3 Test system for validating crosstalk effect

固体激光器发出的激光入射到 16×16 的光栅光调制器阵列上,从阵列发出的衍射光经过一个光阑,只有 ± 1 级衍射光被通过,其它衍射能级被阻挡。接着, ± 1 级衍射光通过一个透镜组投影出器件阵列的像面。在像面处放置一个光电探测器,并调节它的空间位置,使得单个光栅光调制器像素的像面刚好进入光电探测器中,避免不同

像素之间的干扰。 ± 1 级衍射光经过光电探测器产生的光电流经过电流放大器放大、转换得到电压信号,并输出到示波器。加工的光栅光调制器的上、下反射面之间的间距为 $h = (2n+1)\lambda/4$ 。根据器件的工作原理,当光栅光调制器施加电压为零时, ± 1 级衍射光强为亮态,则在示波器上读出的衍射光强的电压信号较高;当施加电压逐渐增大时,可动光栅逐渐下拉, ± 1 级衍射光强逐渐减小,则在示波器上读出的衍射光强电压信号逐渐减小。因此,对器件施加的电压与 ± 1 级衍射光强的电压信号呈反向关系。通过示波器输出的 ± 1 级衍射光强的电压信号可以反应衍射光强的变化以及施加在光栅光调制器上的电压变化。

图4为光栅光调制器在三角波的驱动下的 ± 1 级衍射光强响应曲线。当驱动电压为零时,器件处于亮态;随着驱动电压的增加,可动光栅逐渐下拉,衍射光强减小,直到下拉 $\lambda/4$ 距离时出现暗态,此时驱动电压约为 8 V 。继续增大驱动电压,由于相位差的周期性,衍射光强开始增大。当电压约为 8.5 V 时,衍射光强出现一个突变,说明器件发生吸合现象,可动光栅被下拉到绝缘层上。在一个单调区域,可以利用衍射光强反应器件的驱动电压。在进行交叉效应实验时,为避免器件被吸合,且在一个单调区域中,选择的驱动电压应 $< 8 \text{ V}$ 。

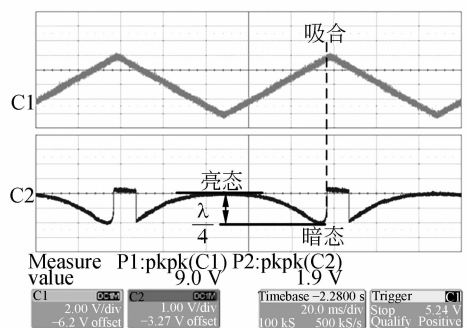


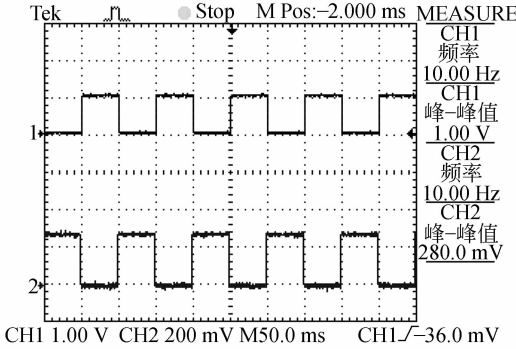
图4 三角波驱动时的 ± 1 级衍射光强

Fig. 4 ± 1 order diffraction intensity when GLM is actuated by a triple-wave voltage

图5(a)、图5(b)和图5(c)分别为在全选点脉冲电压为 1 V 时,全选点像素、半选点像素与非选点像素对应的衍射光强曲线;图5(d)、图5(e)和图5(f)分别为在全选点脉冲电压为 2 V 时,全选点像素、半选点像素与非选点像素对应的衍射

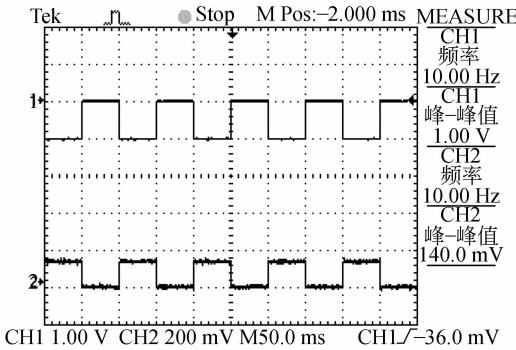
光强曲线。图 5 中脉冲 1 为全选点像素的施加脉冲电压,曲线 2 为不同类型像素的衍射光强的电压信号曲线。

由于加工的阵列像素都是一样的,故在同一个相位差范围,具有相同的衍射光强峰-峰值的两个像素,具有相同振幅的施加脉冲电压。图 5 显示当只驱动全选点像素时,半选点像素和非选点



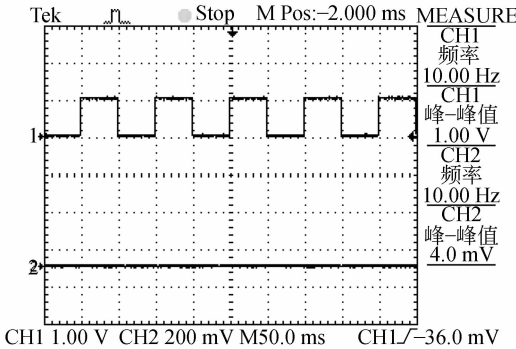
(a) 全选点光强 (1 V)

(a) Intensity of all-selected pixel(1 V)



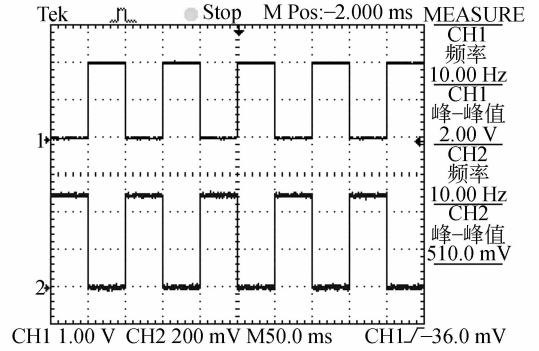
(b) 半选点光强 (1 V)

(b) Intensity of half-selected pixel(1 V)



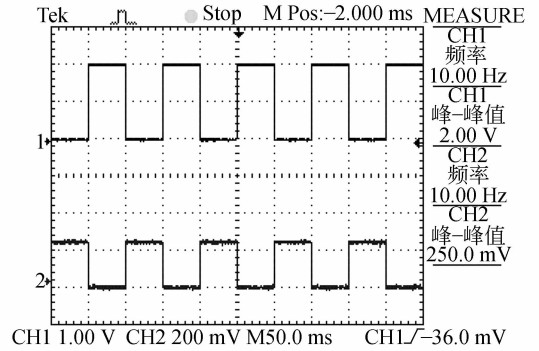
(c) 非选点光强 (1 V)

(c) Intensity of non-selected pixel(1 V)



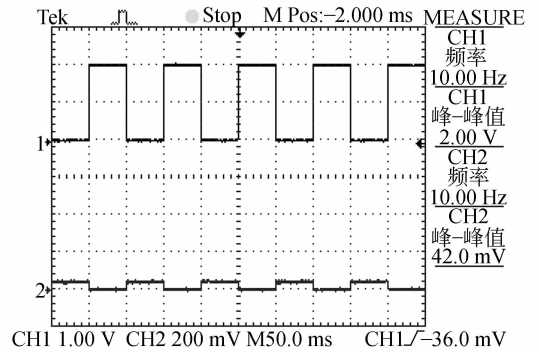
(d) 全选点光强 (2 V)

(d) Intensity of all-selected pixel(2 V)



(e) 半选点光强 (2 V)

(e) Intensity of half-selected pixel(2 V)



(f) 非选点光强 (2 V)

(f) Intensity of non-selected pixel(2 V)

图 5 全选点像素在 1 V、2 V 脉冲驱动下各个像素对应的 ±1 级衍射光强响应

Fig. 5 ±1 order diffraction intensity of different pixels when all-selected pixel is actuated by 1 V and 2 V pulse voltages

像素存在电压,表明阵列存在交叉效应。(1)对比图 5(a)和图 5(e),当全选点像素脉冲电压为 1 V

时的全选点±1级衍射光强峰-峰值电压 280 mV 与当全选点像素脉冲电压为 2V 时的半选点±1级衍射光强峰-峰值电压 250 mV 相近。由此可以得出,在图 5(e)中,半选点电压约为 1 V,而这个结果与半选点电压约为全选点电压的 1/2 的理论相一致。(2)在全选点像素电压相同时,半选点像素电压远大于非选点像素电压,但小于全选点像素电压,这也与交叉效应理论相一致。

图 6 显示了全选点像素在不同振幅脉冲驱动下,全选点、半选点和非选点像素对于±1级衍射光强的电压响应波形。随着全选点像素电压的不断增大,全选点、半选点和非选点像素的光强峰-峰值也不断增大。利用前面的相同的分析,由图 6 可知:半选点电压约为全选点电压的 1/2,并且非选点电压较小,与交叉效应理论的分析具有一致性。

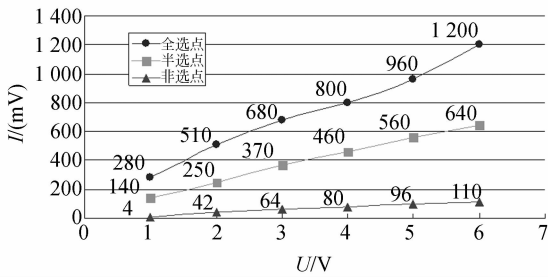


图 6 全选点像素在不同脉冲驱动下各像素的±1级衍射光强

Fig. 6 ±1 order diffraction intensity of different pixels when all-selected pixel is actuated by different pulse voltages

5 抑制交叉效应的方法

在光栅光调制器阵列中,半选点像素和非选点像素在理想情况下,都应该为 0 电压的初始态。由于交叉效应的影响,使它们都会产生电压,从而降低整个光栅光调制器阵列的显示对比度,故有必要减小阵列的交叉效应。抑制交叉效应的方法主要有两种:平均电压法和有源矩阵驱动。

5.1 平均电压法

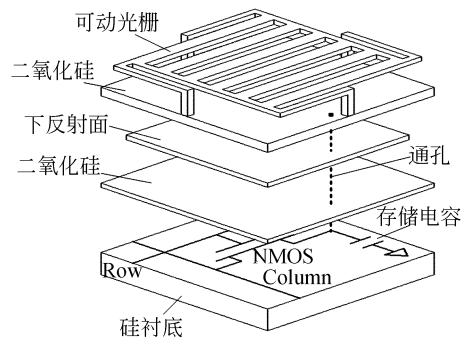
根据前面分析,交叉效应对半选点像素的电压影响较大,故减小半选点像素的电压可以减小交叉效应。由于半选点像素电压与非选点像素电压相差较大,可在非选列上施加适当电压来提高

非选点像素的电压,降低半选点像素的电压。其结果是拉开了全选点像素与半选点像素的电压差,而同时又减小了半选点像素和非选点像素的电压差。最佳效果是使半选点像素和非选点像素电压相同,这就是平均电压法,其原理是把半选点像素的电压和非选点像素的电压平均化。

平均电压法能够在一定程度提高器件的对比度,但无法从根本上消除半选点像素和非选点像素上的电压,而且这种方法主要用于液晶这种存在阈值工作电压的投影显示,这是因为当平均化的电压小于阈值电压时,液晶像素不会出现明显的亮态,从而可以很大程度提高其对比度。但对于光栅光调制器阵列,由图 4 可知,在没有被吸合的情况下,不会出现驱动电压大于某个电压时衍射光强发生很大的变化的情形,表明器件不存在阈值电压。故对于光栅光调制器,平均电压法对器件交叉效应的抑制作用不太理想。

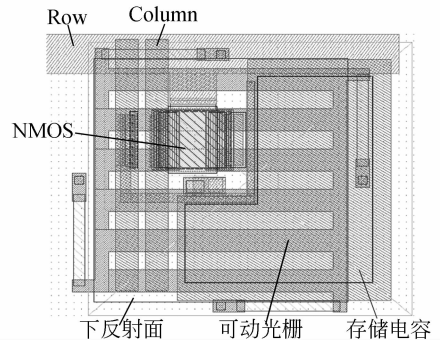
5.2 有源矩阵驱动

有源矩阵驱动的光栅光调制器,如图 7(a)所



(a) 单片集成结构

(a) Structure of monolithic integration



(b) 单片集成的版图

(b) Layout of monolithic integration

图 7 有源矩阵驱动光栅光调制器结构

Fig. 7 Structure of GLM addressed by active matrix

示,每个光栅光调制器由一个单独的有源矩阵单元控制。有源矩阵驱动单元由一个 NMOS 开关管和一个存储电容组成,利用通孔将有源矩阵驱动与光栅光调制器相连接。图 7(b)为利用中芯国际 $0.18\ \mu\text{m}$ 工艺设计的有源矩阵与光栅光调制器单片集成的版图。

光栅光调制器阵列进行逐行扫描时,当某一行扫描线 Row 为高电平时,这一行所有的晶体管同时导通,列数据线 Column 通过晶体管对存储电容进行充放电控制。由于光栅光调制器的下反射面连接到存储电容,故光栅光调制器的电压等于存储电容的电压。当行扫描线变为低电平时,晶体管截止,存储电容的电压将保持不变。由于有源矩阵电路具有保持电压作用,光栅光调制器在没有选通时仍可以保持原来状态,直到下一次被选通扫描。所以,有源矩阵驱动的光栅光调制器可以消除交叉效应,该方法是抑制交叉效应的最佳方法。

参考文献:

- [1] HORNBECK L J. Digital Light Processing TM for high brightness, high-resolution applications [J]. *SPIE*, 1997,3013:27-40.
- [2] BLOOM D M, *et al.*. The grating light valve: revolutionizing display technology [J]. *SPIE*, 1997, 3013:165-171.
- [3] 黄尚廉,闫许,张洁,等. 光栅平动式光调制器光学特性分析 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 749-753.
HUANG SH L, YAN X, ZHANG J, *et al.*. Optical characteristic analysis of grating moving light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 749-753. (in Chinese)
- [4] 张洁,黄尚廉,张智海,等. 蟹型悬臂梁对光栅平动式光调制器性能的影响 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3):315-320.
ZHANG J, HUANG SH L, ZHANG ZH H, *et al.*. Influence of crab-cantilever on performance of

6 结 论

本文介绍了光栅光调制器的工作原理,从理论上分析了无源矩阵驱动的光栅光调制器阵列的交叉效应,通过分析得到交叉效应中半选点像素、非选点像素与全选点像素之间的电压关系。最后,提出并分析了抑制光栅光调制器交叉效应的方法,实验验证了 16×16 阵列的光栅光调制器存在交叉效应。实验结果表明,半选点像素电压为全选点像素电压的 $1/2$,且远大于非选点像素电压,这与理论分析相一致。通过实验测得光栅光调制器的工作电压和吸合电压分别为 $8\ \text{V}$ 和 $8.5\ \text{V}$ 。光栅光调制器采用较低的驱动电压有利于与有源矩阵电路单片集成,实现对它的有源驱动控制,消除交叉效应。

本文主要分析了无源矩阵驱动光栅光调制器的交叉效应,为优化器件的驱动提供了理论依据。目前课题组正在研究利用有源矩阵的方式来驱动光栅光调制器,有关结果将在后续的文献中进行报道。

- grating moving light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):315-320. (in Chinese)
- [5] 张智海. 基于 MOEMS 技术的光栅平动式光调制器阵列若干关键技术研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2008:22-26.
ZHANG ZH H. *Study on some key technologies of MOEMS-based grating moving light modulator Array* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008:22-26. (in Chinese)
- [6] ALIEV A E, SHIN H W. Image diffusion and cross-talk in passive matrix electrochromic displays [J]. *Displays*, 2002, 23:239-247.
- [7] SEUNTIENS P J H, MEESTERS L M J. Perceptual attributes of crosstalk in 3D images [J]. *Displays*, 2005, 26:177-183.
- [8] 蔡伟建. 电路原理 [M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006.
- CAI W J. *Circuits Theory* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. (in Chinese)
- [9] CHENG Y C, DAI C L. A MEMS micromirror

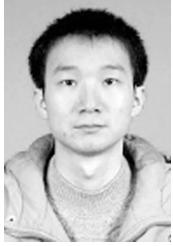
fabricated using CMOS post-process[J]. *Sensors and Actuators*, 2005,120: 573-581.

- [10] GEHNER A, DOLESCHAL W. Active-matrix addressed micromirror array for wavefront correction in adaptive optics[J]. *SPIE*, 2001, 4561: 265-275.

[11] 应根裕,胡文波. 平板显示技术[M]. 北京:电子工业出版社,2002.

YING G Y, HU W B. *Flat display technology* [M]. Beijing: Post & Telecommunications Press, 2002. (in Chinese)

作者简介:



金 珠(1982—),男,重庆市人,2005年于重庆邮电大学获得学士学位,现为重庆大学博士研究生,主要从事基于MEMS微投影显示的驱动控制与IC设计的研究。E-mail: jinzhu_0323@sina.com



张智海(1975—),男,四川绵阳人,博士,讲师,分别于1998年、2001年、2008年在重庆大学获得学士、硕士、博士学位,主要从事基于MEMS器件的设计与工艺的研究。E-mail: zzhincq@163.com



温志渝(1949—),男,重庆市人,教授,博士生导师,1982年于四川大学获学士学位,现为重庆大学新型纳米器件与系统技术国家重点学科实验室主任,主要研究方向为微型传感器、微型分析仪器和MEMS集成技术。E-mail: wzy@cqu.edu.cn



黄尚廉(1936-2008),男,四川乐山人,中国工程院院士,教授,博士生导师,1954年毕业于重庆大学机械工程系,主要从事精密仪器及机械、光电技术与MEMS光学器件的研究。E-mail: sl-huang@cqu.edu.cn

●下期预告

采用在线成型工艺的光纤光栅传感器

李剑芝^{1,2},杜彦良²,刘晨曦²

(1. 北京交通大学 机械与电子控制工程学院,北京 100044;

2. 石家庄铁道学院 河北省大型结构健康诊断与控制重点实验室,河北 石家庄 050043)

为了实现对布拉格光纤光栅的温度补偿功能,提出了一种新型的热应力温度补偿机制实现该功能。设计并制造出一种新型的、采用在线成型工艺的光纤光栅温度自补偿应变传感器,该传感器不仅具有温度补偿功能,而且可以实现应变增敏,解决了管式封装胶粘不牢、胶层老化、以及温度补偿的传感器不能测量应变的问题。实验结果表明,在 $-20\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,传感器实现了良好的温度补偿和应变增敏效果;其中在实验温度范围内,光栅传感器的波长基本保持不变;应变敏感性为 $1.69\text{ pm}/\mu\epsilon$,增至原来的1.4倍,与理论计算值吻合很好。