

基于 SRAM 光栅光调制器阵列 控制系统电路的研究

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: 提出一种基于静态随机存储器(SRAM)的光栅光调制器阵列控制系统电路.介绍了光栅光调制器的加工工艺和工作原理,分析了该控制系统电路的原理和技术指标.利用 Cadence 软件和无锡华润上华 $0.5\mu\text{m}$ 工艺,设计和加工了大小为 8×8 的控制系统电路.通过实验表明:加工的 SRAM 有源矩阵单元能够实现对输出电压的更新或保持;且加工的控制电路能够实现光栅光调制器阵列的有源控制,从逻辑功能上验证了该控制系统电路设计正确性.结果表明:只要该控制系统电路的行、列驱动电路能够在 248MHz 的时钟频率下工作,且有源矩阵单元的开关时间小于 121ns ,则该控制系统电路可以满足分辨率为 1920×1080 ,帧频为 30Hz ,灰度级为 256 的投影显示.

关键词: 微机电系统;光栅光调制器;控制系统电路;静态随机存储器

中图分类号: TN29; TN402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 02-0393-06

Study of a Control System Circuits Based on SRAM for 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 Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A control system circuits based on static random access memory (SRAM) for grating light modulator (GLM) array is proposed in this paper. The process and operating principle of the GLM are introduced. The operating principle and technique parameters of the control system circuits are analyzed. With Cadence software and CSMC's $0.5\mu\text{m}$ process, a 8×8 control system circuits is designed and fabricated. The experimental results indicate that the output voltage can be refreshed or hold by the active matrix addressing based on SRAM; and the GLM can be controlled well by the fabricated control system circuits, which confirms the functional correctness of the designed control system circuits. The result indicates that if both the row and column driving circuits can work well in 248MHz clock frequency and the switch time of the active matrix unite is less than 121ns , this designed control system circuits can be applied in projection display which has 1920×1080 resolution, 30Hz frame frequency and 256 grayscale.

Key words: MEMS; GLM; control system circuits; SRAM

1 引言

近年来,基于 MEMS 技术的投影显示器件成为世界各国研究的热点.在这类 MEMS 器件中,典型的有数字微镜器件(DMD, Digital Micromirror Device)^[1]和光栅光阀(GLV, Grating Light Valve)^[2]. DMD 器件是利用反射原理,其对比度高、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 是利用衍射原理,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一

个扫描器件来完成图像显示,增大器件成本.重庆大学提出一种双层结构的光栅光调制器^[3],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.

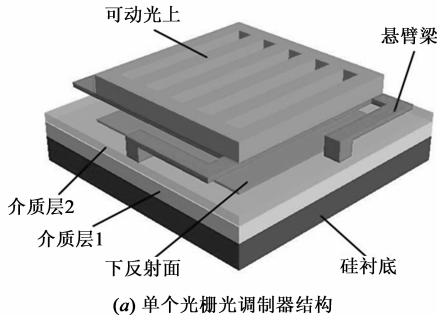
对于小面阵光栅光调制器的投影显示,利用无源矩阵驱动可以实现.但对于较大面阵光栅光调制器的投影显示,由于无源矩阵驱动存在交叉效应,很难实现高质量的图像显示^[4].而利用有源矩阵驱动光栅光调制器,可以使光栅光调制器正真面向高清晰度、高分辨率的投影显示^[5].本文提出一种基于 SRAM 的光栅光调制器

阵列控制系统电路,它将外围驱动电路与有源矩阵驱动单片集成.其特点在于:它可以减小不同模块互连线造成的信号噪声干扰,提高控制系统电路的传输速率,减小了整个芯片的引脚数,并且与门电路进一步优化了该控制系统电路.

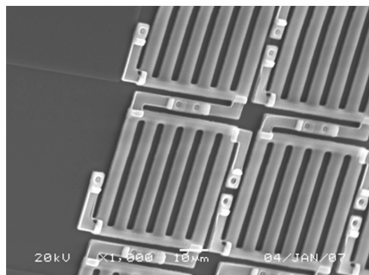
2 光栅光调制器的加工与原理

单个光栅光调制器的结构^[3],如图1(a)所示.它主要由硅衬底、下反射面、二氧化硅、悬臂梁和可动光栅组成.可动光栅和下反射面为铝膜材料,它们之间被介质层和空气层隔离.光栅光调制器是利用表面微机械工艺加工得到,其悬臂梁采用薄梁工艺.首先,在一块<100>P型硅衬底上热氧化一层600nm的二氧化硅;在该二氧化硅上溅射100nm的铝膜,并将其刻蚀形成下反射面;利用PECVD淀积280nm的二氧化硅;然后旋涂580nm的聚酰亚胺(PI)作为牺牲层,并利用等离子体刻蚀形成四个铝柱孔;接着在PI上溅射280nm的铝膜,且金属铝将四个铝柱孔填满;在金属铝膜上旋涂一层光刻胶,并对其进行曝光和清洗处理;然后,再溅射530nm的铝膜,两层金属铝膜被刻蚀形成可动光栅,光刻胶下面的金属铝膜形成悬臂梁;最后,利用等离子体同时刻蚀掉PI和光刻胶,从而形成悬空的三维器件.图1(b)显示了加工的光栅光调制器阵列的一部分.

光栅光调制器的下反射面和可动光栅构成一个相位光栅,其相位差由它们之间的间距控制.对可动光栅和下反射面未施加电压时,相位差为 $\varphi = (2k + 1)\pi$ (k 为正整数, λ 为入射光的波长),衍射光强主要集中在 ± 1 级;对可动光栅和下反射面施加某个电压时,由于



(a) 单个光栅光调制器结构



(b) 实际加工光栅光调制器阵列SEM图

图1 光栅光调制器结构

静电力作用,可动光栅向下平动,此时相位差为 $\varphi = 2k\pi$,衍射光强主要集中在零级.通过收集零级或者 ± 1 级衍射光,可以实现明态与暗态之间的切换,利用二维光栅光调制器阵列就可以实现图像显示.

3 基于SRAM的控制系统电路设计

3.1 控制系统电路的工作原理

图2显示了基于SRAM的控制系统电路结构,它包括行驱动电路、列驱动电路、有源矩阵驱动.行驱动电路包括1080位的移位寄存器、1080个与门和1080位的电平移位器.列驱动电路包括64个30位的移位寄存器组、1920位的锁存器、1920位的缓冲器和1920 \times 2位的电平移位器.有源矩阵驱动由多个基于SRAM的有源矩阵单元组成,其大小为1920 \times 1080.

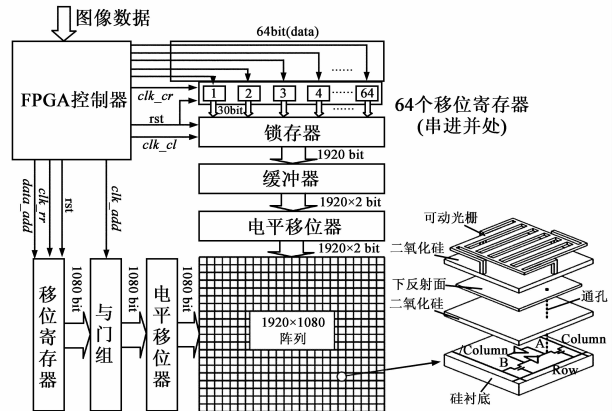


图2 基于SRAM光栅光调制器阵列的控制电路

每位缓冲器由两个反相器串联组成,而这两个反相器的输出电压各自经过一位电平移位器放大后,分别输入到同一个有源矩阵单元的Column和/Column端口.图3(a)表示1位电平移位器的结构,它由低压电路和高压电路组成.低压电路的两个串联反相器主要起输出一对反向控制信号的作用;高压电路的4个MOS管起到电压放大的作用,而高压电路的两个串联反相器主要为提高电平移位器输出的驱动能力.基于SRAM的有源矩阵单元由两个NMOS开关管和两个反相器组成,如图3(b)所示.其中,端点“A”为有源矩阵单元保持电压的输出端口.行扫描信号Row同时连接两个NMOS开关管的栅极,控制它们的开启或截止.一对互为反向的列数据信号Column和/Column分别连接到两个NMOS开关管的漏极,而两个NMOS开关管的源极分别连接到由两个反相器组成的串联环形电路两端.每一行所有的有源矩阵单元由一个Row信号控制,而每一列所有的有源矩阵单元由一对列数据信号Column和/Column控制.通过控制与门的输入端信号,适当地减小行扫描信号的宽度,可以消除有源矩阵相邻行扫描信号之间的冒险和竞争,达到优化控制系统电路的目的.

的.

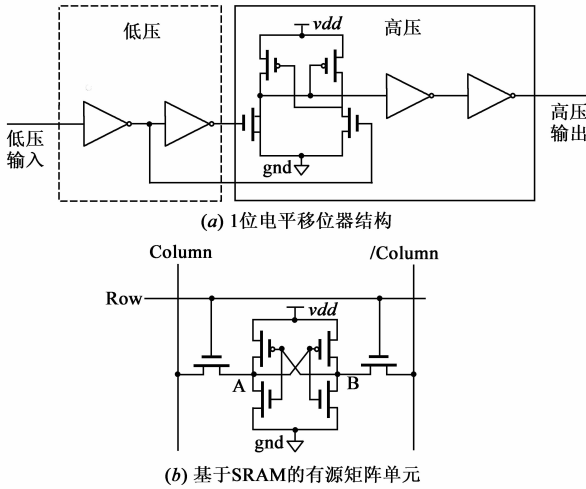


图3 控制系统电路中的部分电路结构

基于 SRAM 的控制系统电路包括:5 个控制信号 (rst 、 clk_rr 、 clk_add 、 clk_cl 和 clk_cr),1 个行移位数据信号 ($data_add$) 和 64 位的列数据信号 ($data$),而这些控制/数据信号由 FPGA 控制输出.复位信号 rst 低电平有效,当 rst 为高电平时,控制系统电路开始工作.当列移位时钟 clk_cr 的上升沿到来时,同时将 64 位数据分别输入到 64 个 30 位的列移位寄存器的第一位输出端. clk_cr 经过 30 个时钟上升沿后,64 个列移位寄存器输出端的数据都全部更新,此时列锁存时钟 clk_cl 高电平将第一行 1920 位数据同时存储到 1920 位列锁

存器中.1920 位列锁存器输出的数据分别输入到 1920 位缓冲器,每位缓冲器输出一对反向的信号.而这一对反向的信号各自经过一位电平移位器进行低压到高压的转换,然后输入到一个有源矩阵单元的一对列数据端口 Column 和 /Column.同时,行移位时钟 clk_rr 上升沿到来,将行移位数据信号 $data_add$ 输入到行移位寄存器的第一位输出端,并且第一位输出为高电平,其余位为低电平.每一位行移位寄存器的输出信号与公共控制信号 clk_add 作为一个与门的两个输入信号,而与门的输出信号经电平移位器放大后输入到有源矩阵的 Row 端口,选通(开启)第一行有源矩阵单元.行移位寄存器循环移位输出高电平,依次扫描选通其他行的有源矩阵单元,但每次只能有一行有源矩阵单元被选通,而没有选通的有源矩阵单元则保持其当前状态.当将光栅光调制器与有源矩阵单片集成时,通过控制有源矩阵驱动的导通或者截止,就可以实现对光栅光调制器电压的控制.

3.2 技术指标的分析

光栅光调制器采用脉宽调制技术实现灰度的显示^[6],对于 4bit 图像数据的时序,如图 4 所示.一帧时间由 4 次扫描时间组成,首先是所有像素图像数据的最高位扫描,然后是所有像素图像数据的次高位扫描,以次类推,最后是所有像素图像数据的最低位扫描.每一位的扫描时间长短由该位加权值决定,通过人眼对 4 次扫描图像的整合,得到一帧 16 灰度级的图像.

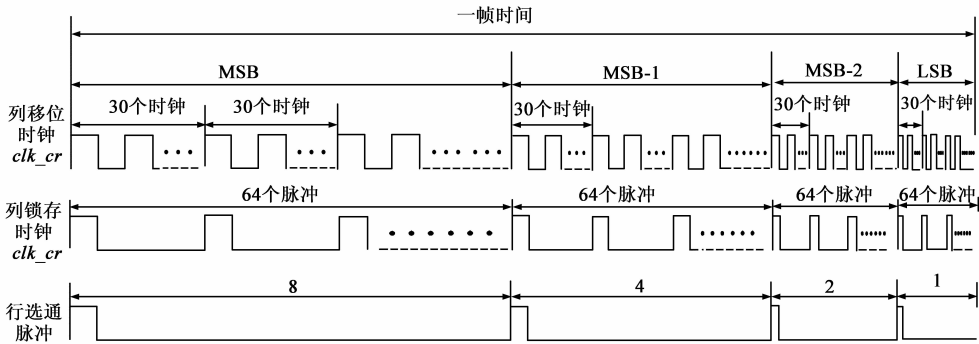


图4 一帧时间的脉冲时序(4bit图像数据)

当单个光栅光调制器阵列显示单色时,对于分辨率为 $m \times n$,帧频为 f ,灰度级 g ,列数据位数为 b 的投影显示.根据脉宽调制器技术的原理,得到行、列移位寄存器最高时钟分别为 f_{R_max} 和 f_{C_max} :

$$\begin{cases} f_{R_max} = f \cdot (g - 1) \cdot n \\ f_{C_max} = f \cdot (g - 1) \cdot n \cdot \frac{m}{b} \end{cases} \quad (1)$$

并且基于 SRAM 有源矩阵单元保持电压的最长时间 t_{max} 和最短时间 t_{min} 可以表示为:

$$\begin{cases} t_{max} = \frac{g}{2(g-1)} \cdot \frac{1}{f} \\ t_{min} = \frac{1}{(g-1)} \cdot \frac{1}{f} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(2),则每一行有源矩阵单元扫描选通的最长时间 t_{R_max} 和最短时间 t_{R_min} 可以表达为:

$$\begin{cases} t_{R_max} = \frac{t_{max}}{n} = \frac{g}{2(g-1)} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{n} \\ t_{R_min} = \frac{t_{min}}{n} = \frac{1}{(g-1)} \cdot \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{n} \end{cases} \quad (3)$$

对于分辨率为 1920×1080 , 帧频为 30Hz, 灰度级为 256(8bit 的图像数据), 列数据位数 b 为 64 的投影显示. 根据式(1)~(3), 可计算出各个技术指标值, 如表 1.

表 1 基于 SRAM 控制系统电路的技术指标

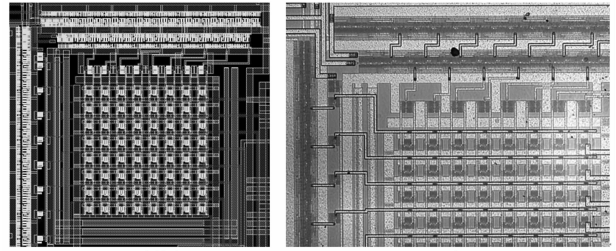
f_{R_max}	f_{C_max}	t_{max}	t_{min}	t_{R_max}	t_{R_min}
8.262MHz	248MHz	16.73ms	130.72 μ s	15.37 μ s	121ns

对表 1 分析可知: 基于 SRAM 的控制系统电路要求行、列驱动电路能够在 248MHz 的时钟频率下工作, 并且有源矩阵驱动的开关时间必须小于 121ns. 由于只要对 SRAM 有源矩阵单元持续供电, 它的电压就可以保持任意长的时间, 故有源矩阵驱动电压保持的最长时间 16.73ms 很容易满足. 这样, 设计的控制系统电路只要满足前面 2 个技术指标, 则该控制系统电路可以满足分辨率为 1920×1080 , 帧频为 30Hz, 灰度级为 256 的投影显示.

4 加工与测试

4.1 控制系统电路的加工

为了从逻辑功能上验证设计的基于 SRAM 的控制系统电路的正确性, 利用 Cadence 软件 and 无锡华润上华 (CSMC) 提供的 0.5μ m 工艺包, 完成基于 SRAM 大小为 8×8 的控制系统电路版图和加工, 如图 5 所示.



(a) 版图 (b) 加工
图 5 基于 SRAM 8×8 的控制系统电路

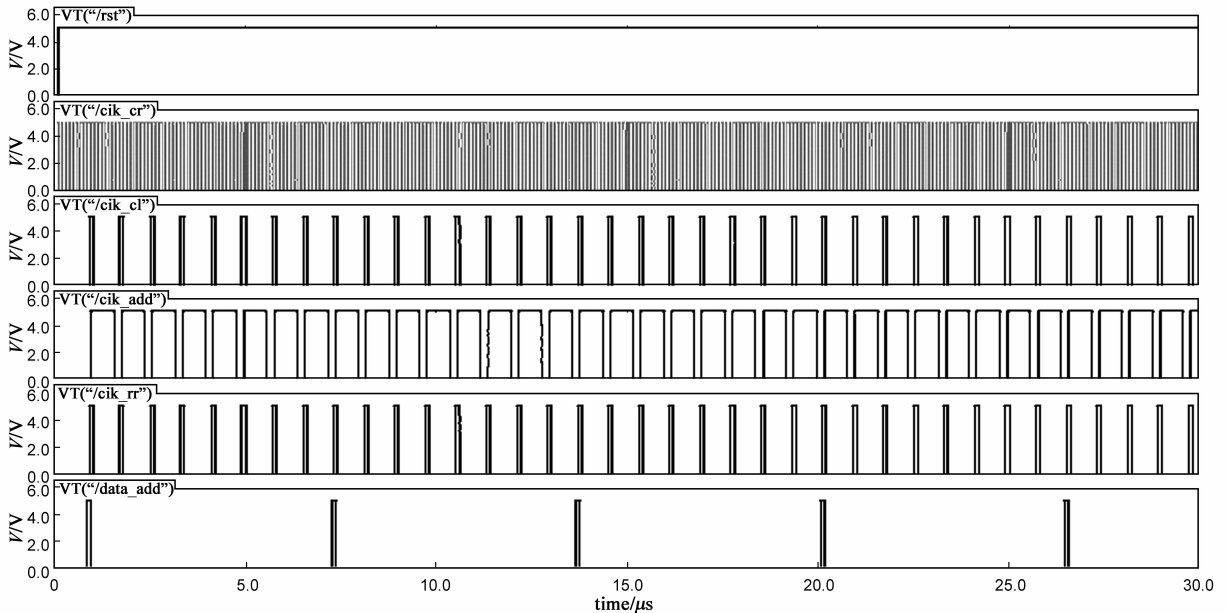
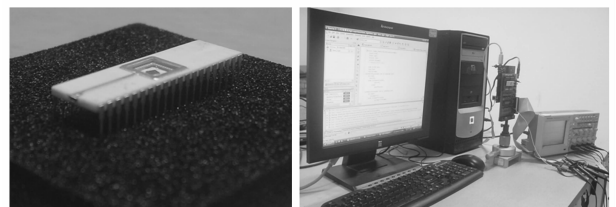


图 6 基于 SRAM 8×8 的控制系统电路的 6 个控制/数据信号的仿真时序

加工的基于 SRAM 的控制系统电路芯片包括: 5 个控制信号输入端口、2 个数据输入端口 ($data_add$ 和 1 位的 $data$), 一个有源矩阵单元的 2 个输入控制端 (Row 和 Column) 和同一列 8 个有源矩阵单元保持电压的输出端口. 图 6 为加工大小为 8×8 控制系统电路的各个控制/数据信号的仿真时序图.

4.2 芯片测试

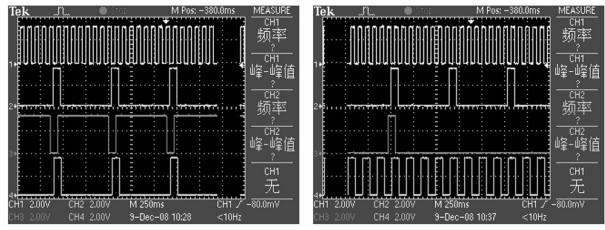
图 7 为加工的控制系统电路芯片的实验系统. 在 PC 机上编写测试程序且调试好后, 通过 JTAG 接口将测试程序下载到 FPGA 中, 此时 FPGA 可以输出各个控制/数据信号到控制系统电路芯片中, 而将控制系统电路芯片输入/输出端口的信号输入到示波器中显示.



(a) 基于 SRAM 的控制系统电路封装 (b) 测试系统

图 7 实验测试

由于复位信号 rst 在一般情况下为高电平, FPGA 输出的其它 6 个控制/数据信号的脉冲曲线, 如图 8. 在图 8(a) 中, 曲线“1”为 clk_cr , 曲线“2”为 clk_cl , 曲线“3”为 clk_add , 曲线“4”为 clk_rr ; 在图 8(b) 中, 曲线“1”为 clk_cr , 曲线“2”为 clk_cl , 曲线“3”为 $data_add$, 曲线



(a) *clk_cr*, *clk_cl*, *clk_add*和*clk_rr* 输出关系 (b) *clk_cr*, *clk_cl*, *data_add*和*data* 输出关系

图8 FPGA输出的6个控制/数据信号的脉冲测试曲线

“4”为 *data*。

由图 8 可知,列数据信号 *data* 经列移位时钟 *clk_cr* 逐位移入到列移位寄存器中。*clk_cr* 经过 8 个时钟周期后,列锁存时钟 *clk_cl* 出现一次高脉冲,将 8 位数据同时移入锁存器中,完成串行数据的并行输出。行移位时钟 *clk_rr* 与列锁存时钟 *clk_cl* 脉冲完全一样。行移位寄存器的数据信号 *data_add* 经 *clk_rr* 上升沿逐位移入 8 位行移位寄存器中。每 8 个 *clk_rr* 周期, *data_add* 出现一次高电平。与门的公共输入信号 *clk_add* 用于消除相邻行移位输出的竞争和冒险,优化了控制系统电路。对比图 6 和图 8 可知,实际从 FPGA 输出的各个控制信号与仿真时序完全一致。

图 9 中显示了加工的 SRAM 有源矩阵单元的电压保持特性,曲线“1”为 Row,曲线“2”为 Column,曲线“3”为 SRAM 有源矩阵单元的保持电压。由图 9 可知:当行选通信号 Row 为高电平时,有源矩阵单元的保持电压与列数据信号 Column 一致;当行选通信号 Row 为低电平时,有源矩阵单元的电压将保持不变,而与 Column 无关。结果表明,加工的 SRAM 有源矩阵电路能够正确实现对电压信号的更新或保持。

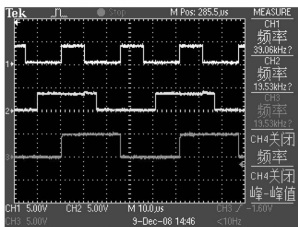


图9 基于SRAM有源矩阵单元 的电压保持特性

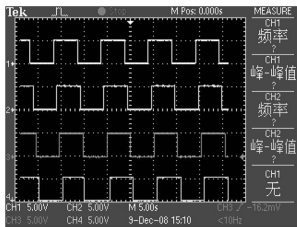


图10 同一列相邻4行的有源矩 阵单元电压的输出曲线

在测试时,将数据信号 *data* 开始的 64bit 输入数据均设置为“1”,而接下来的 64bit 输入数据均设置为“0”,*data* 的输入数据以 64bit 为一个周期变化。这样,在第一次扫描完 8×8 的有源矩阵时,64 个有源矩阵单元都保持高电平;在第二次扫描完这 64 个有源矩阵单元时,它们都保持低电平。*data* 在 6 个控制/数据信号的控制下,得到同一列相邻 4 个有源矩阵单元电压的输出脉冲曲线,如图 10。可见,有源矩阵单元输出的波形与 *data* 的设置要求完全一致;并且由于行扫描选通时间较短,所以在同一时间段内,4 个有源矩阵单元输出的波形曲

线基本一致。结果表明:加工的控制系统电路能够实现对有源矩阵驱动的控制,从逻辑功能上验证了基于 SRAM 控制系统电路设计的正确性。

4.3 投影测试

为了进一步观察加工的控制系统电路芯片驱动光栅光调制器的投影效果,搭建了投影系统,如图 11 所示。FPGA 控制器输出各个控制/数据信号到控制系统电路芯片中,控制系统电路的 8 个输出端口分别连接到光栅光调制器阵列的 8 行,即每行光栅光调制器由控制系统电路的 1 个输出端口控制。同时,波长为 532nm 的固体激光器发出的激光光束以较小的角度入射到光栅光调制器阵列的表面。激光光束经该阵列衍射后入射到一个光阑,而只有零级衍射光可以通过光阑,其它衍射能级均被阻挡。接着,零级衍射光通过一个 DMD 投影仪的投影透镜形成该阵列的一个像面,该像面就是光栅光调制器阵列形成的投影图像。

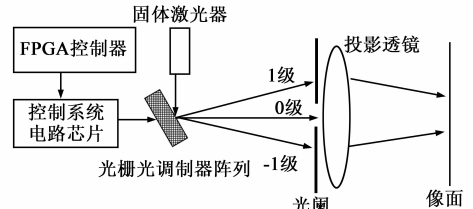


图11 投影显示系统

图 12 显示了 8×8 阵列的光栅光调制器在控制系统电路芯片控制下的 9 幅投影图像。根据光栅光调制器的工作原理可知,当光栅光调制器阵列未被施加电压时,所有的像素均为“暗态”,如图 12 中图像“1”。由于控

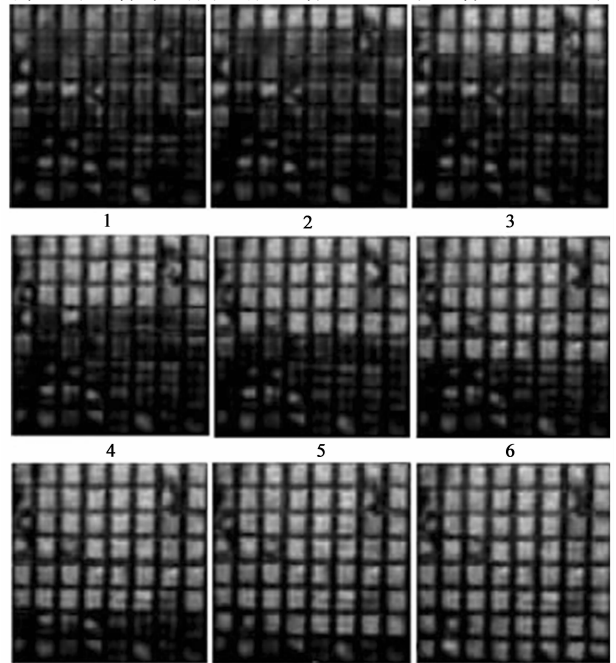


图12 投影成像效果

制系统电路 8 个输出端口逐行输出高电平并且保持,所以图像“2”中第 1 行像素在高电平作用下变为“亮态”,接着图像“3”中第 2 行像素变为“亮态”,直到图像“9”中第 8 行像素变为“亮态”,从而完成对 8 行像素的控制系统.同时由图可知,当某一行像素变为“亮态”时,该行之前的所有像素均保持“亮态”不变,这表明加工的控制系统电路芯片能够实现对光栅光调制器阵列的有源控制,得到较好的投影显示图像.

5 结论

本文提出一种用于光栅光调制器投影显示的基于 SRAM 的控制系统电路.分析了该控制系统电路的工作原理和技术指标.通过分析表明:只要设计的 SRAM 控制系统电路的行、列驱动电路能够在 248MHz 的时钟频率下工作,并且有源矩阵单元的开关时间小于 121ns,则该控制系统电路就可以满足分辨率为 1920×1080 ,帧频为 30Hz,灰度级为 256 的投影显示.利用无锡华润上华(CSMC) $0.5\mu\text{m}$ 工艺加工了基于 SRAM 大小为 8×8 的控制系统电路.实验结果表明:加工的 SRAM 有源矩阵单元能够实现对电压信号的更新或保持;并且加工的控制系统电路能够实现对光栅光调制器阵列的有源控制,得到较好的投影显示效果,为光栅光调制器面向高清晰度、高分辨率的投影显示提供了可靠的依据.

参考文献:

- [1] L J Hornbeck. Digital Light Processing TM for high brightness, high-resolution applications [A]. Electronic Imaging, EI' 97, Projection Displays III [C]. San Jose, CA; February 10 - 12, 1997. 27 - 40.
- [2] D M Bloom, et al. The Grating Light Valve: revolutionizing display technology [A]. Electronic Imaging, EI' 97, Projection Displays III [C]. San Jose, CA February 10 - 12, 1997. 165 - 171.
- [3] Sun Jiyong, Huang Shanglian, et al. Two-dimensional grating light modulator for projection display [J]. Applied Optics. 2008, 47(15): 2813 - 2820.

- [4] Jin Zhu, Wen Zhiyu, et al. Electromechanical characteristic analysis of passive matrix addressing for grating light modulator [J]. Sensors. 2009, 9(3): 2162 - 2175.
- [5] Jin Zhu, Huang Shanglian, et al. Characteristic analysis and study of an active matrix addressing for grating light modulator [A]. 2008 International Conference on Optical Instruments and Technology [C]. Beijing, China, November 16 - 19, 2008. Vol 7159: 71590 - 71599.
- [6] 韩磊. 光栅平动式光调制器机电特性与测试系统研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [7] John P. Uyemura. 超大规模集成电路与系统导论 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [8] Ching-Liang Dai, Fu-Yuan Xiao, et al. An approach to fabricating microstructures that incorporate circuits using a post-CMOS process [J]. J. Micromech. Microeng. 2005, 15(1): 98 - 103.
- [9] 吴春亚, 孟志国, 等. 玻璃衬底上 MIUC Poly-Si TFT 显示驱动电路 [J]. 电子学报, 2005, 33(8): 1349 - 1352.
Wu Chunya, Meng Zhiguo, et al. Display Driving Circuit s Made with MIUC Poly2Si TFTs on Glass Substrate [J]. Acta Electronical Sinica, 2005, 33(8): 1349 - 1352. (in Chinese)

作者简介:



金 珠 男, 1982 年生于重庆市, 现为重庆大学光电工程学院博士研究生, 主要研究方向为基于 MEMS 微投影显示的驱动研究.
E-mail: jinzhu_0323@sina.com



温志渝 男, 1949 年生于重庆市, 重庆大学光电工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为微型传感器与微型分析仪器.
E-mail: wzy@cqu.edu.cn