

陷阱电荷对 GMLM 工作电压的影响*

张 洁[†] 黄尚廉 孙吉勇 张智海 朱 永

(重庆大学光电工程学院 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 光栅平动式光调制器(GMLM)依靠可动光栅在静电力作用下向下反射镜移动,从而改变光程差,实现光调制.结构中 SiO₂ 绝缘层在外加电场作用下产生陷阱电荷,对器件的驱动特性产生影响.作者依据高斯定理,建立 GMLM 存在陷阱电荷情况下的电力学模型,分析了外加电场作用下,GMLM 极板电荷的分布,以及外加电压与可动光栅位移的关系;比较了两种情况下(考虑与不考虑绝缘层陷阱电荷影响)工作电压变化情况.设计了实验方案,进行了实验研究.结果表明:由于陷阱电荷产生陷阱电压,使得产生相同位移需要的工作电压增加;充电时间越长,陷阱电荷产生的陷阱电压越大;实验结果与理论分析吻合.

关键词: 光栅; 陷阱电荷; 工作电压

PACC: 0710C; 4110D **EEACC:** 4145; 5110

中图分类号: O436.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)07-1377-06

1 引言

近年来,随着微机电系统(micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术的成熟和投影显示技术的发展,面向显示基于 MEMS 的光调制器已成为当前研究的热点之一^[1~4].重庆大学提出的基于 MEMS 的光栅平动式光调制器(grating moving light modulator, GMLM)^[5~7],通过改变可动光栅和下反射镜(面)的距离来实现对光能量的调制.

驱动特性是 GMLM 器件中一个重要问题,其中工作电压是影响 GMLM 驱动特性的一个主要因素.因此有必要对 GMLM 工作电压进行详细的分析,为驱动电路设计及改善和提高调制器的工作性能提供依据.

文献[8,9]进行了 GMLM 工作电压的分析,但是忽略了绝缘层 SiO₂ 在外加电场作用下产生陷阱电荷的影响.本文根据实际工艺制作出来的 GMLM 器件,建立完善的电力学模型,并设计实验方案,对工作电压进行分析和实验研究.

2 GMLM 结构和原理

GMLM 器件单像素结构如图 1(a)所示,主要由 1 衬底、2 绝缘层、3 悬臂梁、4 下反射镜、5 可动光栅组成.可动光栅由 4 个按顺时针排列的悬臂梁支撑,并与下反射镜一起构成相位可变的相位光栅.在 p 型硅片的〈100〉面上氧化形成氧化层;溅射、光刻硅铝,形成下反射镜;PECVD 一层 SiO₂,该层起绝缘作用,防止上层的可动光栅在下拉时与下反射镜接触而短路;旋涂 PI 作

为形成空气层的牺牲层,其厚度为通过控制空气层的厚度来控制下反射镜和上层可动光栅的距离;溅射、光刻硅铝,形成上层光栅;释放牺牲层.加工后的器件阵列扫描电镜图如图 1(b)所示.

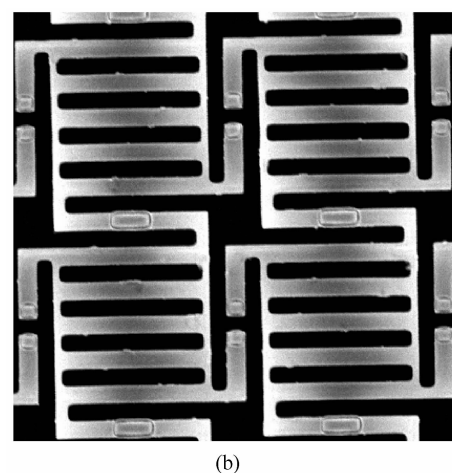
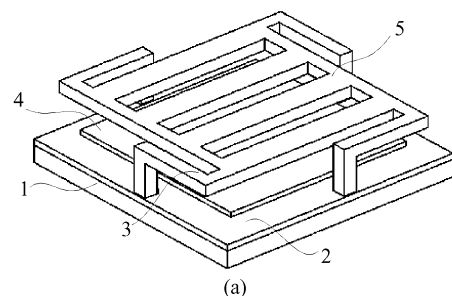


图 1 (a) 单像素 GMLM 器件结构; (b) GMLM 阵列扫描电镜图
Fig.1 (a) Single pixel of GMLM structure; (b) SEM photo of GMLM array

* 重庆市院士基金(批准号:8883),国家自然科学基金(批准号:60708017),中国博士后科学基金(批准号:20070410773),重庆市自然科学基金(批准号:2007BB2110)资助项目

[†] 通信作者. Email: zhangjie@cqu.edu.cn

2007-09-19 收到,2008-03-16 定稿

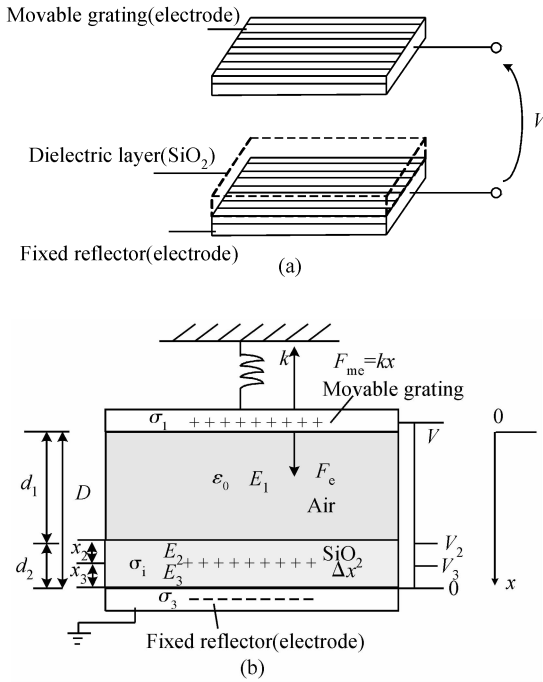


图 2 (a) 平板电容模型; (b) 外加电场与电荷分布示意图
Fig. 2 (a) Parallel plate model; (b) Actuated voltage and charging distribution

根据相位光栅的衍射原理^[6], 当可动光栅与下反射镜之间的光程差为 $(2k + 1)\lambda/4$ (k 取整数, λ 为入射光的波长) 的时候, 衍射光集中在正负一级; 当可动光栅与下反射镜之间的光程差为 $k\lambda/2$ 的时候, 衍射光集中在零级. 从而入射光的相位通过可动光栅的上下活塞式运动得到调制, 实现光的开光态. 应用与投影显示时, 假设调制器下反射镜和上层可动光栅之间的初始光程差为 $(2k + 1)\lambda/4$, 衍射光强主要集中在正负一级, 屏幕上得到的为亮点, 对应于显示的亮态; 通过外加激励电压, 使得上层可动光栅在静电力的作用下向下移动, 光程差变为 $k\lambda/2$, 正负一级的衍射光强为零, 屏幕上得到的为暗点, 对应于显示的暗态. 由多个 GMLM 形成的二维面阵就可以实现二维图像的显示效果.

3 工作电压分析

器件工作时, 可动光栅在静电吸引力作用下相对下反射镜作垂直运动, 从而改变可动光栅与下反射镜构成的相位光栅相位差以实现光调制. 可动光栅的位置由静电力和悬臂梁回复力决定. 可动光栅与下电极之间静电吸引力可以简化为平板电容结构, 图 2(a) 为 GMLM 平板电容模型, 图 2(b) 为外加电场与电荷分布示意图. 下文将分两种情况 (考虑绝缘层陷阱电荷和不考虑绝缘层陷阱电荷) 来讨论工作电压.

3.1 不考虑陷阱电荷影响

假设不考虑 SiO_2 绝缘层陷阱电荷影响, 忽略边缘效应的话, 静电吸引力 F_c 和机械回复力 F_{mc} 分别为

$$F_c = \frac{\epsilon_0 A}{2} \times \frac{V^2}{(d_1 - x + d_2/\epsilon_r)^2} \quad (1)$$

$$F_{mc} = -kx \quad (2)$$

其中 ϵ_0 为空气介电常数; ϵ_r 为 SiO_2 的相对介电常数; A 为可动光栅作为平行平板电容器时上极板有效面积; V 为上下电极间施加的电压; d_1 为空气层的原始厚度; d_2 为 SiO_2 层的厚度; x 为悬臂梁变形量, 即可动光栅下拉距离; k 为等效弹性系数.

在达到吸合电压时悬臂梁处于平衡状态, 即满足

$$F_{mc} = F_c \quad (3)$$

分析可得

$$x^3 - 2(d_1 + d_2/\epsilon_r)x^2 + (d_1 + d_2/\epsilon_r)^2 x + \frac{\epsilon_0 AV^2}{2k} = 0 \quad (4)$$

解方程, 得施加工作电压 V 与位移 x 的关系为

$$V = \sqrt{\frac{2k(x^3 - 2(d_1 - d_2/\epsilon_r)x^2 + (d_1 - d_2/\epsilon_r)^2 x)}{\epsilon_0 A}} \quad (5)$$

3.2 考虑陷阱电荷影响

在低电场情况下, 空气和介质表现为良好的绝缘体. GMLM 的工作电压通常为几伏到十几伏, 但由于可动光栅和下反射镜之间的距离为微米量级. 因此, 对处于激励状态下的器件, 其工作电场 E 达到几千伏/厘米 ~ 几十千伏/厘米, 在如此高的电场作用下, 空气和电极会产生大量的带电离子, 正负离子在电场中分别向两极运动. 这些离子会被 SiO_2 表面或体内的能级陷阱捕获而驻留在 SiO_2 内的表面和体内, 从而使得 SiO_2 带电, SiO_2 上所带的这种电荷称为陷阱电荷. 在陷阱电荷的影响下, 空气层中的电场将是外加电场与陷阱电荷所产生的电场的叠加, 极板上的电荷将会重新分布^[10~12].

假设 SiO_2 中的电荷位于介质中距离下极板 x_3 处, 电荷的厚度为 Δx , 电荷密度为 σ_i , 上极板和下极板上的面电荷密度分别为 σ_1 和 σ_3 , SiO_2 的相对介电常数为 ϵ_2 . 由高斯定理得^[12]

$$E_1 = \sigma_1/\epsilon_0$$

$$E_3 - E_2 = \Delta x\sigma_i/\epsilon_0\epsilon_2 \quad (6)$$

$$E_1 = \epsilon_2 E_2$$

$$E_1 d_1 + E_2 x_2 + E_3 x_3 = V$$

解方程得

$$E_1 = \frac{1}{d_1 + \frac{1}{\epsilon_2}(x_2 + x_3)} (V - \Delta x\sigma_i x_3/\epsilon_0\epsilon_2) \quad (7)$$

(6) 式的推导中假设 SiO_2 介质中的电荷只局限于某一深度 x_3 的范围内, 实际上, 电荷是连续分布在介质的表面和体内. 考虑到对于电压不是很大的情况下, 带电粒子的能量比较小, 电荷主要分布在 SiO_2 介质的表面和体内接近表面的浅层区域内, 即

$$E_1 = \frac{1}{(d_1 + d_2/\epsilon_2)} (V - \sigma_2 d_2/\epsilon_0\epsilon_2) \quad (8)$$

其中 σ_2 为 SiO_2 表面的面电荷密度.

那么, 可动光栅受到的作用力为

$$F = A\sigma_1 E_1 / 2 = \frac{A\epsilon_0}{2} \left(\frac{1}{d_1 + d_2/\epsilon_2} \right)^2 (V - \sigma_2 d_2 / \epsilon_0 \epsilon_2)^2 \quad (9)$$

可以看出, 陷阱电荷的存在, 使得可动光栅受到的作用力变小.

电荷的存贮密度 σ_2 是由于充电陷阱电荷引起的, 根据文献[12], 电荷密度的增加速度与时间不是线性关系, 随着时间的增加, 其增加速度不断减小. 电荷的存贮密度 σ_2 (根据图 2 的加电方式, 陷阱电荷为正电荷) 近似为

$$\sigma_2(t) = N_0 q(1 - \exp(-t/\tau_1)) \quad (10)$$

其中 N_0 为介质的陷阱密度; q 为单位电荷量; τ_1 为充电时间常数; t 为充电时间. 当外加电场撤消以后, 一部分陷阱电荷在自身电场的作用下会向背电极运动而消失, 另一部分电荷被自由空间的异性离子中和, 从而使得存贮电荷密度发生衰减. 其衰减的规律可近似为

$$\sigma_2(t) = \sigma_0 \exp(-t/\tau_2) \quad (11)$$

其中 σ_0 为电压刚撤消时的介质层电荷密度; τ_2 为放电时间常数.

由于陷阱电荷的作用, 相当于面电荷密度 σ_2 产生陷阱电压 V_{offset} , 根据高斯定理可得

$$V_{\text{offset}} = -\frac{\sigma_2}{\epsilon_r} d_2 \quad (12)$$

将(10)和(11)式带入(12)式, 可得陷阱电压为

$$V_{\text{offset}} = \begin{cases} \left\{ \frac{N_0 q d_2}{\epsilon_0 \epsilon_2} [1 - \exp(-t/\tau_1)] \right\}^2, & \text{当 } V \neq 0 \\ \left[\frac{\sigma_0 d_2}{\epsilon_0 \epsilon_2} \exp(-t/\tau_2) \right]^2, & \text{当 } V = 0 \end{cases} \quad (13)$$

当一矩形脉冲电压驱动 GMLM 的时候, 可动光栅在外加电场作用下的位移变化为

$$x = \begin{cases} \left\{ \frac{A\epsilon_0}{2k} \left(\frac{1}{d_1 + d_2/\epsilon_2} \right)^2 \left\{ V - \frac{N_0 q d_2}{\epsilon_0 \epsilon_2} [1 - \exp(-t/\tau_1)] \right\} \right\}^2, & \text{当 } V \neq 0 \\ \left\{ \frac{A\epsilon_0}{2k} \left(\frac{1}{d_1 + d_2/\epsilon_2} \right)^2 \left[\frac{\sigma_0 d_2}{\epsilon_0 \epsilon_2} \exp(-t/\tau_2) \right] \right\}^2, & \text{当 } V = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中 V 为施加的驱动电压.

由于器件的放电时间常数大于充电时间常数, 器件工作一段时间 t 后 (总的充电时间为 t_1 , 总的放电时间为 t_2), 那么此时器件的陷阱电压为

$$V_{\text{offset}} = \frac{Nq d_2}{\epsilon_0 \epsilon_2} [1 - \exp(-t_1/\tau_1)] - \frac{Nq d_2}{\epsilon_0 \epsilon_2} [1 - \exp(-t_1/\tau_1)] \exp(-t_2/\tau_2) \quad (15)$$

4 实验

为了观察 GMLM 驱动特性, 设计了如图 3(a) 所示的实验原理图, 搭建了如图 3(b) 所示的实验装置. 它主

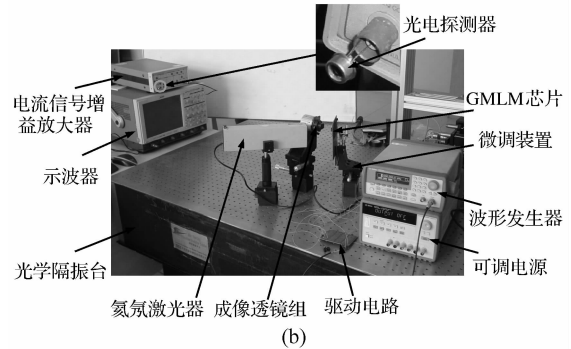
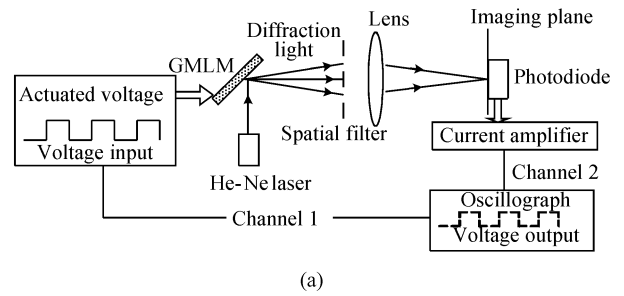


图 3 (a) GMLM 驱动特性实验原理示意图; (b) 实验装置图
Fig.3 (a) Experimental principle for GMLM actuation characteristic; (b) Experimental setup sketch-map

要由光源、GMLM、滤波器、透镜组、光电探测器、静电驱动、电流放大器和示波器等部分组成. 示波器可以显示驱动电压, 以及光电探测器的输出电压两路信号.

激光入射到 GMLM 上, 衍射光经过空间滤波器, 再经过投影透镜组成像在像面上; 像面通过光电探测器, 在示波器上显示输出信号; 选择合适的光电探测器, 并调整投影成像的空间位置, 使得单个 GMLM 的像面大小与光电探测器的光敏面相等, 避免不同 GMLM 像素之间的相互干扰.

图 4 为实验得到的示波器输出信号随矩形驱动电压的变化情况. 图中信道 1 为 GMLM 的外加驱动电压; 信道 2 为 GMLM 像面上输出的电压. 图 4(a) 为实验开始时对 GMLM 施加 12.8V 的工作电压, 此时的输出电压为 22.8V; 经过 50s 后, 同样的工作电压, 但是输出电压减小为 12.4V (图 4(b) 所示); 再经过 22s 后, 输出电压减小为 10V (图 4(c) 所示); 再经过 129s 后, 输出电压减小为 6.4V (图 4(d) 所示). 可见, 随着施加电压的时间越长, 同样工作电压对 GMLM 位移 (光强随着位移的变化而变化) 驱动作用越小, 与理论分析吻合. 为了达到同样的输出电压, 调节 GMLM 外加工作电压, 如图 4(e) 所示, 要抵消陷阱电荷产生的陷阱电压的影响, 此时的外加工工作电压为 23.2V, 比较最初的 12.8V, 可见工作电压加大, 即要 GMLM 产生相同的位移, 需要加大驱动电压.

5 结果与分析

实验中, 外加电场的周期为 100s, 其他相关参数为:

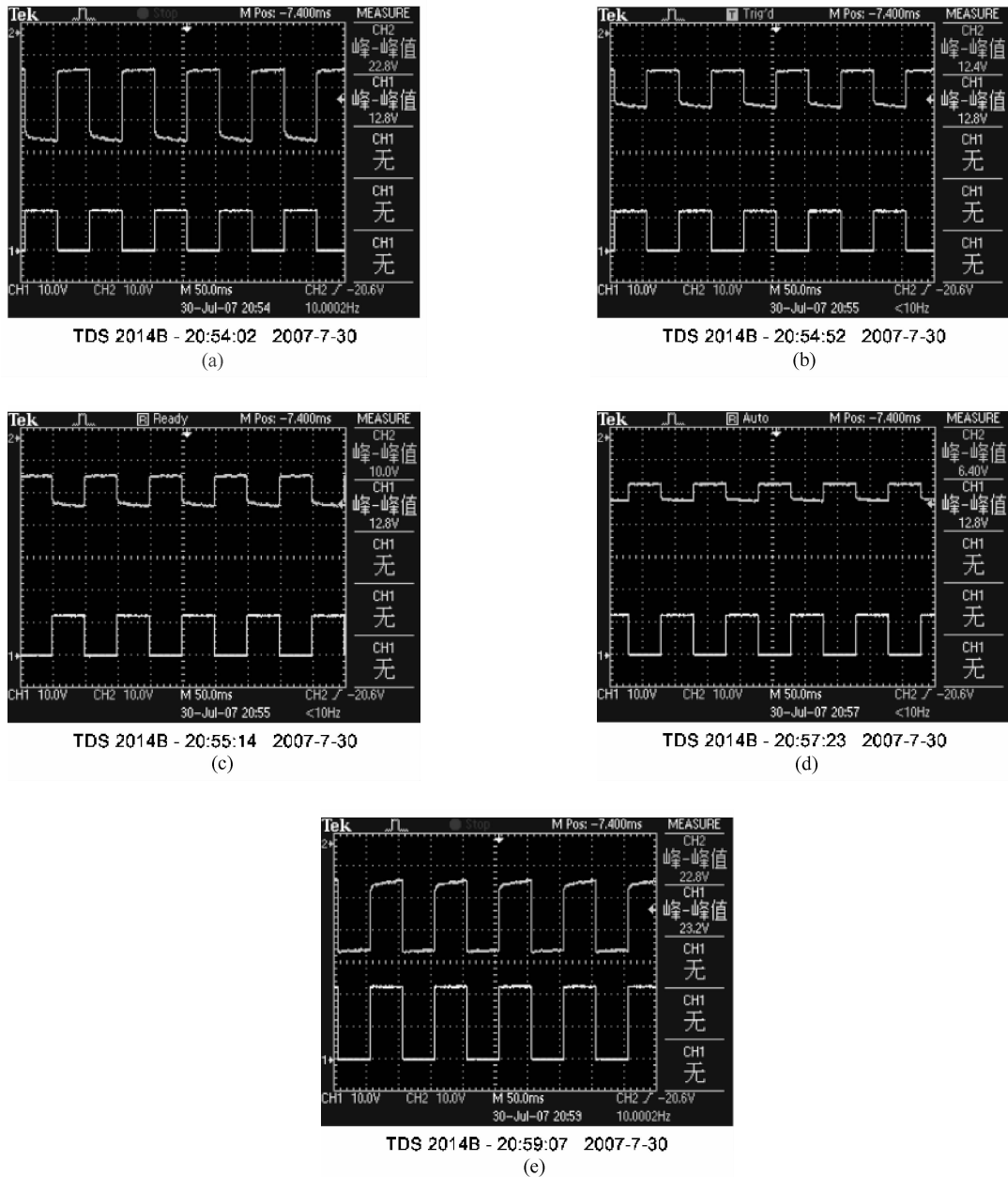


图 4 实验结果(GMLM 外加驱动电压和 GMLM 像面上的输出电压)

Fig. 4 Experimental results (voltage input and voltage output on the imaging plane)

电荷的充电时间常数和放电时间常数分别为 194 和 300s, 光栅的弹性系数 $k = 3.97\text{N/m}$, $N_0 = 2 \times 10^{16}/\text{m}^2$, 可动光栅的面积 $A = 896/2\mu\text{m}^2$, $d_1 = 1.24\mu\text{m}$, $d_2 = 0.2\mu\text{m}$, $q = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$, $\epsilon_2 = 3.8$. 图 5 为根据(14)和(15)式得到的 GMLM 在周期性矩形脉冲电压作用下的可动光栅位移变化情况.

根据(16)式, 50s 后, 陷阱电压为 2.2954V; 72s 后, 陷阱电压为 3.2174V; 201s 后, 陷阱电压为 7.6581V; 306s 后, 陷阱电压为 10.3745V, 要与最初的 12.8V 产生相同的位移, 那么此时的电压为 $12.8 + 10.3745 = 23.1745\text{V}$, 比较图 4(e), 实验得到的数据为 23.2V. 随着时间的增加, 陷阱电压增加, 在外加驱动电压不变的情况下, GMLM 位移减少.

GMLM 在正常工作时的频率将达到 kHz 以上, 此

时, 电荷的充电和放电时间常数远大于工作电压的周期, 因此在驱动电压的一个周期内, 存贮电荷的量并没有明显的变化.

由前面分析可知, 在外加电压的作用下, GMLM 的绝缘层 SiO_2 中会被存贮一定量的陷阱电荷, 使器件不能正常工作. 由于陷阱电荷的极性与电压同号, 当可动光栅上所加电压为正的时候, SiO_2 中的电荷为正; 当电压反接的时候, SiO_2 中的电荷为负. 如果让 GMLM 在 t_1 时间段工作在正偏置电压状态 ($V > 0$), 而在后续的 t_2 时间段, 工作在负偏置电压状态 ($V < 0$). 则 t_1 时间段存贮的电荷和 t_2 时间段存贮的电荷极性相反, 正负电荷相互中和, 可以降低陷阱电荷的影响. 这部分实验工作将另文分析.

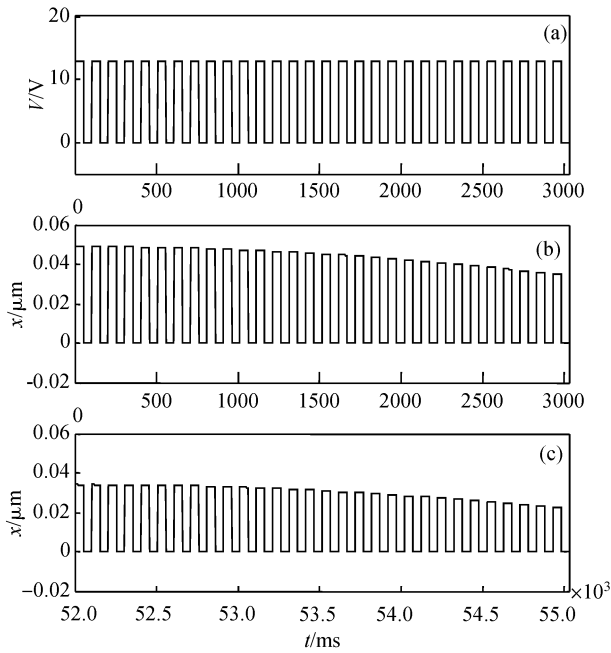


图5 驱动电压的周期为 0.1s 情况下介质层充电电荷对光栅位移的影响 (a) 驱动电压; (b) 刚施加 12.8V 电压位移变化情况; (c) 50s 后位移变化情况

Fig.5 Displacement of movable grating with applying voltage (a) Applying voltage; (b) $V = 12.8V$; (c) 50s later

6 结论

本文通过对 GMLM 在两种情况下(考虑与不考虑绝缘层陷阱电荷影响)的工作电压分析,并搭建了 GMLM 驱动特性测试实验系统,进行了相关的实验研究和分析,结果表明:由于 GMLM 工艺制作过程中,采用 SiO_2 绝缘层,在可动光栅和下反射镜施加驱动电压时,绝缘层产生了陷阱电荷;陷阱电荷的存在导致了可动光栅的位移随着施加电压时间的增加而减少。

本文的工作,对 GMLM 驱动电路的设计提供了理论和实验依据.还有大量实验和定量分析工作,笔者将进一步深入研究,结果将另文报道。

参考文献

[1] Mao Huibing, Xing Peisheng, Lai Zhongsheng. Theoretical and experimental study on driving mechanism for micromechanical

modulator. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, 24(3): 160 (in Chinese)[茅惠兵, 忻佩胜, 赖宗声. 微机械光调制器激励机制的理论和实验研究. 半导体光电, 2003, 24(3): 160]

[2] Wu Yi, Huang Shanglian, Zhang Jie, et al. Electromechanical characteristics analysis for the reflector-moveable grating light modulator. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(14): 1251 (in Chinese)[伍艺, 黄尚廉, 张洁, 等. 反射面平动式光栅光调制器的实现及机电特性分析. 中国机械工程, 2005, 16(14): 1251]

[3] Huang Shanglian, Yan Xu, Zhang Jie, et al. Optical characteristic analysis of grating moving light modulator. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(5): 749

[4] Zhang Jie, Huang Shanglian, Fu Hongqiao, et al. Optical characteristics analysis and simulation of grating light valve. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1452 (in Chinese)[张洁, 黄尚廉, 付红桥, 等. 光栅光阀的光学特性分析和仿真. 光学学报, 2005, 25(11): 1452]

[5] Zhang Jie, Huang Shanglian, Yan Xu, et al. Optical performance analysis and simulation of reflector moving grating light modulator. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(6): 824 (in Chinese)[张洁, 黄尚廉, 闫许, 等. 反射镜平动式光栅光调制器的光学特性分析. 光子学报, 2006, 35(6): 824]

[6] Zhang Jie, Huang Shanglian, Yan Xu, et al. Structural analysis and optimization of grating moving light modulator. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8): 1121 (in Chinese)[张洁, 黄尚廉, 闫许, 等. 光栅平动式光调制器结构参数的优化分析. 光学学报, 2006, 26(8): 1121]

[7] Zhang Jie, Huang Shanglian, Zhang Zhihai, et al. A wavelength scanning method for measuring micro distance of grating moving light modulator. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5): 1764 (in Chinese)[张洁, 黄尚廉, 张智海, 等. 波长扫描方法测试光栅平动式光调制器的微间距. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1764]

[8] Yan Xu. Structural parameter analysis and experiment of MEMS-based grating moving light modulator. Dissertation for Master Degree of Chongqing University, 2006: 8 (in Chinese)[闫许. 基于 MEMS 光栅平动式光调制器结构参数分析与实验. 重庆大学硕士学位论文, 2006: 8]

[9] Han Lei. Electromechanical characteristics and test system of grating moving light modulator. Dissertation for Master Degree of Chongqing University, 2007: 15 (in Chinese)[韩磊. 光栅平动式光调制器机电特性与测试系统研究. 重庆大学硕士学位论文, 2007: 15]

[10] Wibbeler J, Pfeifer G, Hietschold M. Parasitic charging of dielectric surfaces in capacitive microelectromechanical systems (MEMS). *Sensors and Actuators A*, 1998, 71(1/2): 74

[11] Spengen W M V, Puers R, Mertens R, et al. A comprehensive model to predict the charging and reliability of capacitive RF MEMS switches. *J Micromech Microeng*, 2004, 14: 514

[12] Zafar S, Callegari A, Gusev E F, et al. Charge trapping in high k gate dielectric stacks. *Proc Int Electron Devices Meeting (IEDM)*, 2002: 517

Effect of Trapped Charges on GMLM Pull-Out Voltage*

Zhang Jie[†], Huang Shanglian, Sun Jiyong, Zhang Zhihai, and Zhu Yong

(Key Laboratory for Opto-Electronic Technology & System, Education Ministry of China,
Opto-Electronic Engineering Department, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A grating moving light modulator (GMLM) modulates light energy by changing the distance of the movable grating and the underlying fixed reflector. The dielectric material SiO₂ provides trap sites for charges both in the volume and the surface in high electric field, which will affect GMLM driving characteristic. With Gauss theory, the electrodynamic model is set up. The distribution of trapped charges and the relationship between the displacement of movable grating and applied voltage are analyzed in detail. An experimental scheme is designed. The experiment indicates that increasing the applied voltage achieves the same displacement due to the influence of trapped charges, a longer charge time, and a bigger offset voltage, which is consistent with theoretical analysis.

Key words: grating; trapped charges; pull-out voltage

PACC: 0710C; 4110D **EEACC:** 4145; 5110

Article ID: 0253-4177(2008)07-1377-06

* Project supported by the Academician Fund of Chongqing Municipality (No. 8883), the National Natural Science Foundation of China (No. 60708017), the Post-Doctoral Science Fund of China (No. 20070410773), and the Natural Science Foundation of Chongqing Municipality (No. 2007BB2110)

[†] Corresponding author. Email: zhangjie@cqu.edu.cn

Received 19 September 2007, revised manuscript received 16 March 2008

©2008 Chinese Institute of Electronics