

介质层充电对光栅光调制器驱动的影响*

孙吉勇[†] 黄尚廉 张 洁 张智海

(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 400044)

(2007 年 7 月 26 日收到, 2007 年 10 月 16 日收到修改稿)

利用高斯定理分析了二氧化硅层中存在电荷时光栅光调制器中的空间电场分布, 得到了光栅光调制器在介质层存贮电荷影响下的静电力公式. 分析了调制器中二氧化硅介质的充电和放电机理, 得到了光栅的位移随介质充放电的变化关系. 通过分析指出当驱动电压的周期和介质的充放电时间常数相近的时候, 介质层中存贮的电荷会使得可动光栅被下拉后发生缓慢的回跳. 电压被撤消后, 光栅会受到存贮电荷所产生电场的作用而被下拉. 当驱动电压的周期远小于介质的充放电时间常数的時候, 随着存贮电荷的增加, 光栅在有外加电场时被下拉的距离和外加电场为零时被下拉的距离逐渐相等, 光调制器输出光的光强变化逐渐减弱, 当存贮电荷产生的电场为外加电场的一半时, 器件完全失效. 通过实验对理论分析的结果进行了验证, 实验结果和理论分析一致. 文章最后提出了一种消除介质层所存贮的电荷的方法, 通过实验证明了这种方法的可行性.

关键词: 微机电系统, 光栅光调制器, 介质层充电

PACC: 4282, 7220J

1. 引 言

近年来, 随着微机电系统 (micro-electro-mechanical systems, 简称为 MEMS) 技术的不断发展, 光 MEMS 已成为当前研究的热点之一, 基于 MEMS 的光调制器在投影显示领域的应用是其中一个主要方向. 利用 MEMS 技术, 人们提出了各种各样的光调制器, 其中一个代表性的是德州仪器公司的数字微镜 (digital micro-mirror devices, 简称为 DMD)^[1], DMD 是利用反射微镜的偏转实现对光路的调制, 其多层结构工艺导致了制作过程十分复杂. 另外一个是由斯坦福大学的 Bloom 等人^[2]提出的光栅光阀 (grating light valve, 简称为 GLV), 光栅光阀具有结构简单的优点, 但是, 由于器件本身是一个线阵结构, 因此需要通过一个扫描装置来产生二维的图像显示, 增加了系统的复杂性和装配难度. 重庆大学提出了一种面阵型光栅光调制器^[3], 其加工工艺较 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.

可靠性是 MEMS 器件中一个十分重要的问题, 静电力驱动中的介质层充电是影响器可靠性的一个

关键因素^[4-6]. 光栅光调制器也是基于静电力驱动的器件, 因此有必要对介质层充电对光栅光调制器驱动特性的影响进行详细的分析, 以改善和提高调制器的工作性能.

本文首先简单介绍了光栅光调制器的工作原理, 接着详细的分析了二氧化硅绝缘层的充电电荷对调制器驱动性能的影响. 通过对调制器的静电力驱动实验, 对二氧化硅介质层存贮电荷的影响进行了验证, 最后提出了一种解决该问题方法.

2. 光栅光调制器原理

光栅光调制器的结构如图 1 所示. 它主要由下层反射镜和上层的可动光栅组成, 中间的二氧化硅层是起绝缘的作用, 防止上层的可动光栅被下拉时与下反射镜接触而短路. 根据相位光栅的衍射原理^[3], 当可动光栅与下反射镜之间的光程差 Δ 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 Δ 为 $k\lambda/2$ 的时候, 衍射光集中在零级. 图 2 给出了当光程差 Δ 分别为 $\lambda/4$ 和 $\lambda/2$ 时, 光栅光调制器的衍射光强分布. 如果在反射镜和可动光

* 国家自然科学基金 (批准号: 60708017) 和重庆市院士基金 (批准号: 8883) 资助的课题.

[†] E-mail: stoiker@163.com

栅上外加一个电场,通过静电力改变反射镜和光栅之间的距离,就可以实现对光的调制.

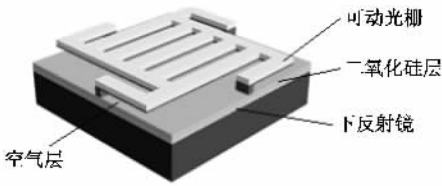


图1 光栅光调制器结构

图3为光栅光调制器用于投影显示的原理图.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.由多个光栅光调制器形成的二维面阵就可以实现显示效果.

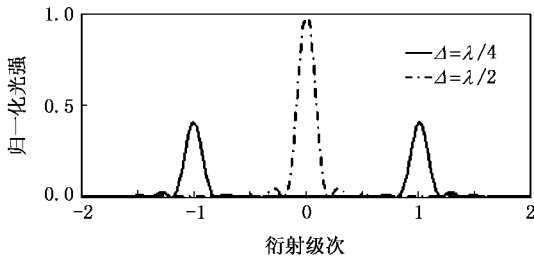


图2 相位光栅的衍射光强分布图

射、光刻硅铝,形成上层光栅.释放牺牲层,得到空气层.最终加工得到的GLM光调制器如图4所示.单个光栅光调制器的尺寸为 $48\mu\text{m} \times 48\mu\text{m}$,光栅常数为 $8\mu\text{m}$.

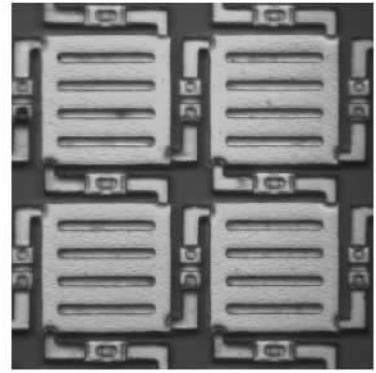


图4 光栅光调制器

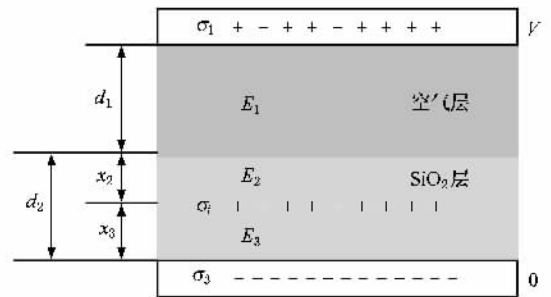


图5 光栅光调制器的外加电压与电荷分布

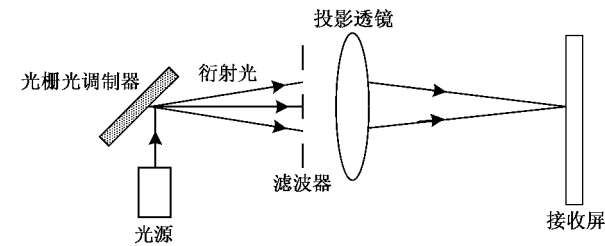


图3 光栅光调制器投影原理图

3. 工艺制作

在p型硅片的100面上氧化形成一个500—600nm的氧化层;溅射、光刻硅铝,形成下反射镜;PECVD一层300nm的二氧化硅;旋涂PI作为形成空气层的牺牲层,空气层的厚度为500nm左右.溅

4. 介质层充电对调制器驱动特性的影响

根据静电驱动原理,外加电压V和可动光栅的下拉距离x之间的关系表示^[7]为

$$F = \frac{A\epsilon_0}{2} \times \frac{V^2}{(d_1 + d_2/\epsilon_2)^2} = QE/2 = kx, \quad (1)$$

其中A为光栅的面积,ε₀为空气的介电常数、ε₂为二氧化硅的相对介电常数.d₁,d₂分别为空气和二氧化硅层的厚度.Q为光栅上的电荷,E空气层间的电场强度.

(1)式是在电场强度比较低的情况下得到的,在低电场情况下,空气和介质表现为良好的绝缘体.光栅光调制器的工作电压虽然不是很高,通常为几伏到十几伏.但是由于光栅与下反射镜之间的距离很小,只有1μm左右.因此,对处于激励状态下的器件,其工作电场E达到几十到几百kV/cm.在如此

高的电场作用下,空气和电极板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.对于如图5所示的情况,正离子向下运动到二氧化硅的表面,有些能量大的离子则可能会穿透到二氧化硅的体内.这些正离子会被二氧化硅表面或体内的能级陷阱俘获而驻留在二氧化硅的表面和体内,从而使得二氧化硅带正电荷.二氧化硅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,因此(1)式中的 Q 和 E 都将发生变化.

为了公式推导的方便,先假设二氧化硅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 ,二氧化硅的相对介电常数为 ϵ_2 .由高斯定理得^[8]

$$\begin{aligned} E_1 &= \sigma_1 / \epsilon_0, \\ E_3 - E_2 &= \Delta x \sigma_i / \epsilon_0 \epsilon_2, \\ E_1 &= \epsilon_2 E_2, \\ E_1 d_1 + E_2 x_2 + E_3 x_3 &= V. \end{aligned} \quad (2)$$

解方程得

$$E_1 = \frac{1}{d_1 + \frac{1}{\epsilon_2}(x_2 + x_3)} (V - \Delta x \sigma_i x_3 / \epsilon_0 \epsilon_2), \quad (3)$$

(2)式的推导中假设介质中的电荷只局限于某一深度 x_3 的范围内,实际当中,电荷是连续分布在介质的表面和体内.利用(3)式对所有二氧化硅体内和表面的电荷积分得

$$E_1 = \frac{1}{(d_1 + d_2 / \epsilon_2)} \left(V - \sigma_2 d_2 / \epsilon_0 \epsilon_2 - \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_2} \int_0^{d_2} \sigma_i x dx \right), \quad (4)$$

σ_2 为二氧化硅表面的面电荷密度.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,电荷主要分布在二氧化硅介质的表面和体内接近表面的浅层区域内.(4)式可以简化为

$$E_1 = \frac{1}{(d_1 + d_2 / \epsilon_2)} (V - \sigma_2 d_2 / \epsilon_0 \epsilon_2), \quad (5)$$

结合(1)和(5)式可得单位面积光栅受到的作用力为

$$F = \sigma_1 E_1 / 2 = \frac{\epsilon_0}{2} \left(\frac{1}{d_1 + d_2 / \epsilon_2} \right)^2 (V - \sigma_2 d_2 / \epsilon_0 \epsilon_2)^2, \quad (6)$$

由于 V 和 σ_2 同号,由(6)式可以看出,电荷的存在,使得可动光栅受到的力变小.当电压撤消后,光栅

受到的作用力为

$$F = \sigma_1 E_1 / 2 = \frac{\epsilon_0}{2} \left(\frac{1}{d_1 + d_2 / \epsilon_2} \right)^2 (\sigma_2 d_2 / \epsilon_0 \epsilon_2)^2, \quad (7)$$

(6)和(7)式中的 σ_2 是时间的函数.当外加电场不为零的时候,介质层会不断的充电,而当外加电场撤消以后,介质中的电荷会在自身电场的作用下向背电极运动而放电.因此(6)中的 σ_2 随着时间的增加而增加,(7)中的 σ_2 随着时间的增加而减小.电荷充放电的速度和电荷密度大小决定着静电场的变化特性.空气在高电场下的电气特性可以用汤逊理论来描述^[9],当电压高于巴申最小电压的时候电场就会被击穿.汤逊理论和巴申曲线在经典的宏观尺寸条件下和实验数据吻合的比较好,但是对于空气间隙小于 $4 \mu\text{m}$ 的模型,巴申曲线就不再适用^[10].此时空气的电气特性和真空中的情形类似^[11].在电场作用下,空气中的电流密度可以用Flower-Nordheim公式表示^[12]:

$$J = \frac{e^3 E^2}{8\pi h \phi} \exp \left[\frac{8\pi \sqrt{2m_{\text{eff}}} \phi^{3/2}}{3heE} \right], \quad (8)$$

其中, ϕ 是阴极材料的势垒高度, E 为场强, m_{eff} 为空气中的有效电子质量.电荷的存贮密度与电流之间存在如下关系^[13]:

$$\alpha(t) = \eta J_{f-n} t, \quad (9)$$

其中, η 为俘获系数,由材料的俘获截面决定.(8)式中电流密度是电场 E 的函数,而电场 E 随着陷阱电荷的增加而不断减小.因此,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.它们之间的关系可以用下式近似的表示^[14]:

$$\alpha(t) = Nq(1 - \exp(-t/\tau_1)), \quad (10)$$

其中, N 为介质的陷阱密度, q 为单位电荷量, τ_1 为充电时间常数.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指数分布^[15]:

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

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.结合(6)(7)(10)(11)式可得当一矩形脉冲电压驱动光栅光调制器的时候,光栅受到的作用力可表示为

$$F = \begin{cases} \frac{\epsilon_0}{2} \left(\frac{1}{d_1 + d_2/\epsilon_2} \right)^2 \left\{ V - \frac{Nqd_2}{\epsilon_0\epsilon_2} \right. \\ \left. \times [1 - \exp(-t/\tau_1)] \right\}^2, & \text{当 } V \neq 0 \\ \frac{\epsilon_0}{2} \left(\frac{1}{d_1 + d_2/\epsilon_2} \right)^2 \left[\frac{\sigma_0 d_2}{\epsilon_0\epsilon_2} \exp(-t/\tau_2) \right]^2, & \text{当 } V = 0 \end{cases} \quad (12)$$

利用(1)和(12)式可得光栅在外加电场作用下的位移变化情况:

$$x = \begin{cases} \frac{A\epsilon_0}{2k} \left(\frac{1}{d_1 + d_2/\epsilon_2} \right)^2 \left\{ V - \frac{Nqd_2}{\epsilon_0\epsilon_2} \right. \\ \left. \times [1 - \exp(-t/\tau_1)] \right\}^2, & \text{当 } V \neq 0 \\ \frac{A\epsilon_0}{2k} \left(\frac{1}{d_1 + d_2/\epsilon_2} \right)^2 \left[\frac{\sigma_0 d_2}{\epsilon_0\epsilon_2} \exp(-t/\tau_2) \right]^2, & \text{当 } V = 0 \end{cases} \quad (13)$$

通过(13)式可以看出,当一外加电压作用在光栅光调制器上的时候,光栅被下拉;随着时间的增加,二氧化硅介质中的存贮电荷不断增加,光栅被下拉的距离不断减小,因此光栅将出现回跳现象.当外加电场撤消以后,光栅受到存贮电荷所产生的电场的作用,光栅的位移发生一个跳变,然后又随着存贮电荷的不断衰减而变小.

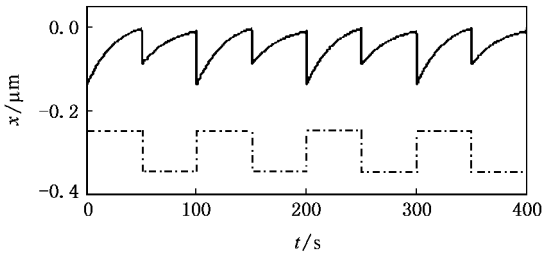


图6 低频情况下介质层充电电荷对光栅位移的影响($V = 10 \text{ V}$)

图6为利用(13)式得到的光栅在周期性矩形脉冲电压作用下的位移变化情况.相关参数的设置为:外加电场的周期为100 s,电荷的充电时间常数和放电时间常数分别为100 s和50 s,光栅的弹性系数 k 为3.97 N/m, N 等于 $2 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$,可动光栅的面积 A 为 $896 \mu\text{m}^2$.图6清楚的表明,由于介质层充电电荷的影响,光栅位移发生了回跳和跳变.

光栅光调制器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.当外加电压分别不为零和为零的时候,光栅收到的外界电压分别等效于 V

$-\sigma_2 d_2/\epsilon_0\epsilon_2$ 和 $-\sigma_2 d_2/\epsilon_0\epsilon_2$,设光栅在两种状态下被下拉的距离分别为 Δ_1 和 Δ_2 .随着时间的增加,存贮电荷不断增加, $V - \sigma_2 d_2/\epsilon_0\epsilon_2$ 不断变小, $-\sigma_2 d_2/\epsilon_0\epsilon_2$ 的绝对值不断增大,因此, Δ_1 将不断变小,而 Δ_2 将不断变大, $\Delta_1 - \Delta_2$ 将不断变小,因此光栅光调制器输出光强的变化将逐渐变小.当电荷增加到 $V = \sigma_2 d_2/2\epsilon_0\epsilon_2$ 时候, $\Delta_1 = \Delta_2$,因此光栅的位移将不随外加电压的变化而变化,调制器的输出光强将不变,器件将完全失效.图7为利用(13)式得到的器件在1 kHz的电压脉冲驱动下,驱动电压刚施加时光栅位移的变化和1 min以后光栅位移的变化,从图7中可以清楚的看出,1 min以后,光栅的位移变化量明显变小.

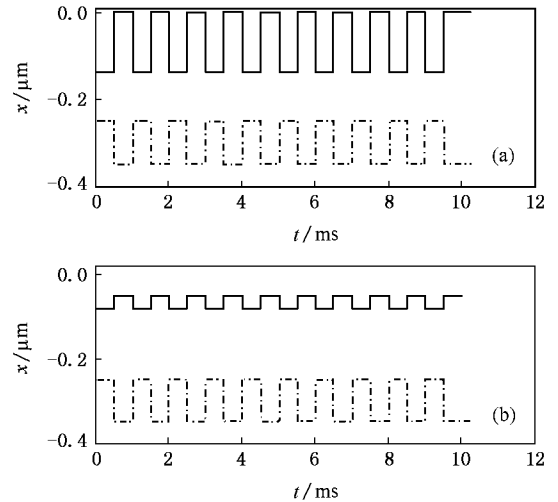


图7 高频情况下介质层充电电荷对光栅位移的影响 (a)刚施加电压时;(b)施加电压1 min后

5. 实验验证

为了验证介质层充电电荷对光栅光调制器驱动特性的影响,搭建了如图8所示的实验装置.它主要由光源、光调制器、光学空间滤波器、信号发生器、放大器、投影透镜组、光电探测器、电流放大器和示波器等部分组成.

He-Ne激光器发出的光入射到光栅光调制器上,衍射光通过空间滤波器之后,零级光被阻挡,只有正负一级的光被通过.通过滤波器之后的光被投影透镜组成像到光电探测器的表面.实验所用的器件是一个 16×16 的二维阵列,因此在探测器所在的成像面上,所得到是一个 16×16 的光栅光调制器

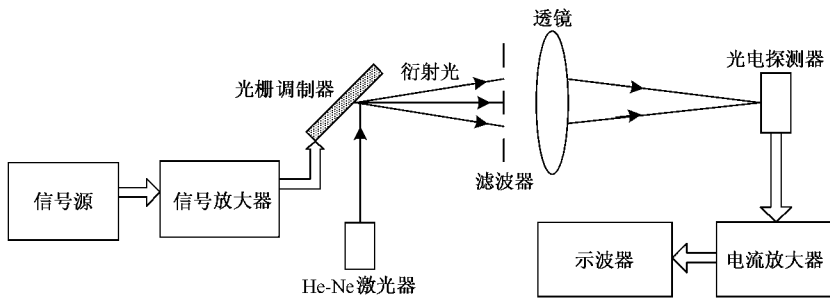


图 8 实验装置

放大器放大处理之后形成电压信号输出到示波器，通过示波器读出对应的光强信号。当对调制器施加一工作电压 V 后，在静电力的作用下，上层可动光栅与下反射镜之间的光程差变为 $k\lambda/2$ ，此时正负一级的衍射光强为零，调制器处于暗态，探测器上接收到的光能量为零，示波器所得到的光强信号也为零。因此通过示波器上的光强信号变化就可以反映出光栅的位移变化情况。

图 9 为通过实验得到的示波器输出信号随脉冲驱动电压的变化情况。驱动电压为 10 V，周期为 100 s。对比图 (6) 和图 (9) 可得，理论分析和实验得到的结果基本一致。光栅在被外加电压下拉之后，其下拉的距离随着时间的增加而不断减小，光栅出现缓慢的回跳。当电压被撤消后，光栅的位移发生了一个明显的跳变后，又缓慢的回跳。

图 10 为当驱动电压的周期为 1 s 的时候，调制器的响应特性。图 10(a) 为驱动电压刚加时的情形，图 10(b) 为 1 min 以后的器件输出信号。从图 10(a) 可得，由于电压的周期远小于介质的充放电时间常数，因此，在每个作用周期内，光栅的位移没有发生

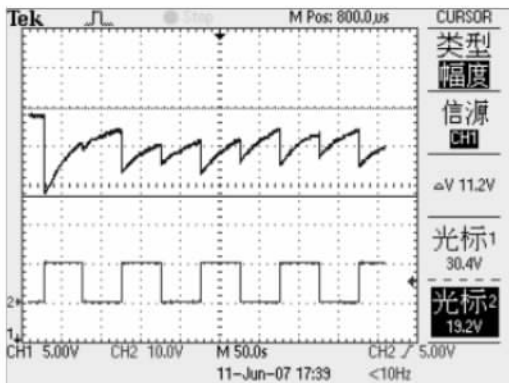


图 9 低频电压驱动时，光栅随 SiO₂ 充放电而发生回跳

像。选择合适的光电探测器，调整投影成像的空间位置，使得单个光栅光调制器的像面大小与光电探测器的光敏面相等，避免不同调制器之间的相互干扰。根据前面的分析，调制器在初始状态的时候，上层可动光栅与下反射镜之间的光程差为 $(2k + 1)\lambda/4$ ，当施加的激励电压为零的时候，调制器处于亮态，探测器上有光照射；光电探测器生成的光电流被电流

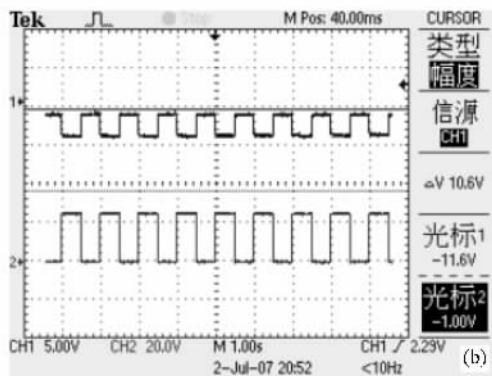
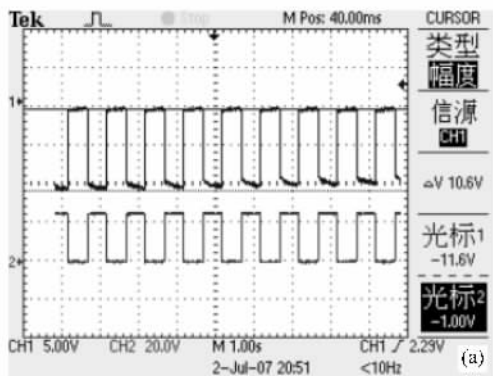


图 10 高频情况下介质层充电电荷对调制器的影响 (a) 刚施加驱动电压时的信号输出；(b) 驱动电压施加一段时间以后的信号输出

明显的变化.但是对比图 10 两幅图会发现,一段时间以后,示波器得到的输出信号的幅度变小了.对比图 10 和图 7 可得,这和理论分析完全一致.

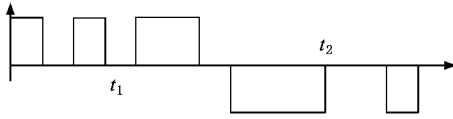


图 11 调制器施加电压反向示意图

6. 解决问题的办法

通过前面的分析可知,在外加电压的作用下,光栅光调制器的绝缘层二氧化硅中会被存贮一定量的陷阱电荷,使器件不能正常工作,甚至使之完全失效.由于陷阱电荷的极性与电压同号,即当光栅上所加电压为正的时候,二氧化硅中的电荷为正,当电压反接的时候,二氧化硅中的电荷为负.如果让调制器在 t_1 时间段工作在正偏置电压状态,而在后续

的 t_2 时间段,让调制器工作在负偏置电压状态(如图 11 所示).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,就可以降低陷阱电荷的影响^[16],提高器件的可靠性和使用寿命.为了验证上面的分析,进行了如下的实验,先给调制器施加一正向工作电压信号,一段时间以后再给调制器施加一反向工作电压信号,分析器件的响应特性.图 12(a)为在初始正向电压电平的作用下,器件的输出光强变化情况,图 12(b)为一分钟后器件的响应特性.图 12(c)为将电压反向后,器件的响应特性.对比三个图可以看出,将电压反向后,器件的响应幅度明显增大,与图 12(a)基本相同,这说明,将电压反向后,消除了图 12(b)中所显示出来的存贮电荷的影响.因此,通过该实验可以证明将驱动电压的极性周期性的反向,就可以减弱或消除电荷存贮的影响.在光栅光调制器正常工作的时候,电压极性的转换周期要小于电荷的充电时间常数,使得在电荷的影响还没有足够大的时候,电压的极性就已经被反向.

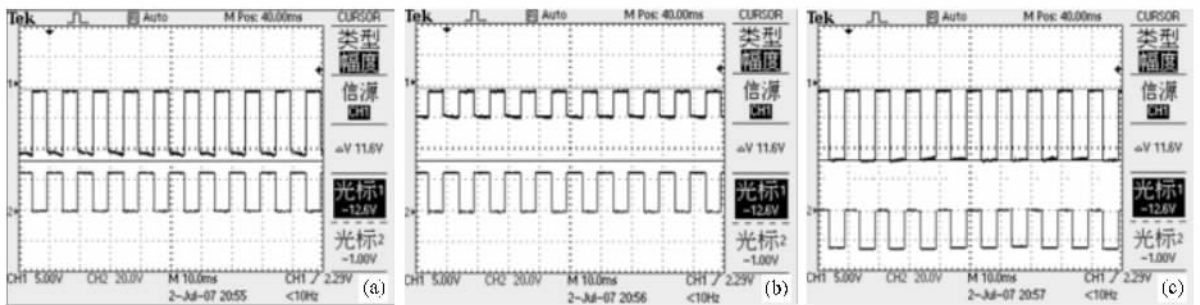


图 12 通过将电压反向消除介质充电电荷的实验结果 (a) 刚施加工作电压时的响应;(b) 一段时间后的响应;(c) 电压反向后的响应

7. 结 论

光栅光调制器中的空气层在高电场的作用下处于预击穿状态,产生的带电粒子被二氧化硅中的陷阱所捕获,使得二氧化硅被充电而带上和电压同号的电荷.充电电荷使得光调制器中的空间电场发生变化.在电场的作用下,陷阱电荷的密度随时间的

增加而不断增加.光栅受到的静电力将不断变小,因此光栅将出现回跳现象;当电压撤消之后,光栅继续受到陷阱电荷产生的电场的作用而被下拉.当驱动信号的频率比较高的时候,单个周期内,陷阱电荷的影响不是很明显,但是它会使得器件随外加电压的响应变化越来越小,最终使器件失效.介质层的充电电荷可以通过施加周期性的反向电压而消除.

[1] Hornbeck L J 1997 *Proc. SPIE Projection Displays III* 3013 27

[2] Bloom D M 1997 *Proc. SPIE Projection Displays III* 3013 165

[3] Zhang J, Huang S L 2006 *Acta Opt. Sin.* 26 1121 (in Chinese)

[张洁,黄尚廉 2006 光学学报 26 1121]

- [4] Merlijn W , van Spengen 2004 *J. Micromech. Microeng.* **14** 514
- [5] Jiirgen W 1998 *Sensors and Actuators A* **71** 74
- [6] Steven T P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 94910_1
- [7] Cleo C 1999 *Annual Report of the IEEE/CEIDP Society* 327
- [8] Sessler G M 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 405
- [9] Liang X D 2003 *Hight Voltage Engineering* (Beijing : Tsinghua University Press) p16 (in Chinese) [梁曦东 2003 高电压工程 (北京 清华大学出版社) 第 16 页]
- [10] Torres J M , Dhariwal R S 1999 *Microsystem Technologies* **6** 6
- [11] Paul G S , Erik D T 2001 *Proceedings of the Forty seventh IEEE Holm Conference on Electrical Contacts* 245
- [12] Todd G R , Richard K W 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 93
- [13] John S , David C E 1999 *37th International Reliability Physics Symposium Proceedings* 128
- [14] Sufi Z 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 9298
- [15] Xia Z F 2001 *Electrets* (Beijing : Science Press) p212 (in Chinese) [夏钟福 2001 驻极体 (北京 科学出版社) 第 212 页]
- [16] Koarz 2000 *United States Patent Patent No.* 6114481

Effect of dielectric charging on gating light modulator^{*}

Sun Ji-Yong[†] Huang Shang-Lian Zhang Jie Zhang Zhi-Hai

(*The Key Laboratory for Opto-electronic Technology & System , Education Ministry of China , Opto-electronic Engineering Department , Chongqing University , Chongqing 400044 , China*)

(Received 26 July 2007 ; revised manuscript received 16 October 2007)

Abstract

Electric field distribution of the light modulator affected by the dioxide dielectric charging is deduced with Gauss law. Electrostatic force formula of the movable grating under such condition is obtained. Charging and discharging mechanisms of the dielectric have been analyzed. The relationship between movable grating's displacement and the dielectric charge is obtained. The results show that the grating will bounce back and then be pulled down when it is actuated by low frequency voltage. When the actuating voltage period is far shorter than the charging time constant, variation of the modulator's output light intensity will be increasingly small until the modulator is disabled thoroughly when the field produced by the storage charges is half that of the actuating electric field. Experiment was carried out to test the theoretical analysis and the results agree well. Finally, a method is proposed to eliminate the storage charge, and its feasibility is proved by the experiment.

Keywords : micro-electro-mechanical systems , grating light modulator , dielectric charging

PACC : 4282 , 7220J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60708017) and the Academician Foundation of Chongqing Municipality (Grant No. 8883).

[†] E-mail : stoiker@163.com