

# 新型激光驱动可变形反射镜的模型、研制及特性\*

向 东<sup>1,2,†</sup> 王青玲<sup>3</sup> 张光勇<sup>4</sup> 周丽娜<sup>1</sup>

(1 中国地质大学数学与物理学院, 武汉 430074)

(2 华中科技大学光电子信息与工程学院, 武汉 430074)

(3 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 武汉 430074)

(4 华中科技大学激光国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要:** 介绍了一种新型的利用激光驱动的可变形反射镜. 它包括三个部分: 以聚脂薄膜为主体做成的  $2\mu\text{m}$  厚的镜面, 支撑镜面的  $6\mu\text{m}$  高栅格状的支撑柱, 由光敏材料砷化镓 (GaAs) 构成的感光底层. 同时在镜面与感光底层之间施加偏置的高频交流电压. 当感光底层背面被激光照射时, GaAs 中载流子的变化导致镜面与感光底层之间电阻的重新分布, 从而镜面与感光底层之间电压发生变化, 因此在静电力的作用下镜面将会发生相应的形变. 文中分析了此反射镜工作的理论模型, 介绍了此装置的制作工艺, 并通过实验验证了偏置电压幅值、交流电压频率等参数对可变形反射镜性能的影响.

**关键词:** 自适应光学; 可变形反射镜; 光驱动; 光学特性

EEACC: 2520E; 4180

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0269-06

## 1 引言

变形镜(DMs)是自适应光学系统的关键部件. 美国 Itek 公司最先开始研制变形镜, 并于 1973 年研制成功第一块 21 单元整体压电变形镜. 80 年代法国 Laserdot 公司研制成功 52 单元分立式压电变形镜, 并提供给欧洲南方天文台使用. 我国这方面起步较晚, 中国科学院光电研究所在 1986 年研制成功 19 单元分立式压电变形镜, 并马上应用于被誉为“神光”的核聚变光学系统, 这是世界上首次将变形镜应用于校正激光核聚变光学系统的波前误差. 可变形反射镜作为空间光调制器, 还成功地在光束净化、光束整形、激光腔内像差校正以及通信和眼科医学等方面都得到了应用.

典型的自适应光学系统使用波前传感器探测入射光波前畸变, 然后通过控制器向波前校正设备发出控制信号, 控制可变形反射镜镜面的动作, 使镜面发生形变. 当镜面形变与畸变相位满足相位共轭关系时, 畸变就会被抵消掉, 从而波前得到恢复, 成像分辨率得到提高<sup>[1]</sup>. 镜面形变的能力影响着整个自适应光学系统的性能.

然而传统的压电式、电磁式、液压式等驱动方式的变形镜, 驱动电压高, 体积大, 驱动电极也较少, 因

此镜面形变的性能也较差. 最新出现的利用静电驱动的可变形反射镜尽管有驱动电压低, 变形量大的优点, 但是每一个单元都需要一个闭环回路进行控制, 不利于器件的微型化. 为了解决这些问题, 本文提出了一种利用激光进行远距离驱动的可变形反射镜.

## 2 器件结构设计及研制

### 2.1 反射镜的结构设计

图 1 是可变形反射镜的结构示意图. 它主要由三部分构成: 装置的下部分是由直径 50mm GaAs 半导体晶片构成的感光底层, 导电的 ZnO 层被沉淀在晶片的下表面; 装置的中部是  $6\mu\text{m}$  的栅格状的支撑柱; 装置的上部是用聚脂薄膜做成的  $2\mu\text{m}$  的镜面, 并且在聚脂薄膜的上表面镀一层  $0.4\mu\text{m}$  的铝膜, 这样可以极大地提高镜面对可见光的反射能力.

装置的工作原理如下: 在镜面与感光底层之间施加偏置交流电压, 当感光底层背面被激光照射时, GaAs 中载流子的变化导致镜面与感光底层之间电阻的重新分布, 从而镜面与感光底层之间电压发生变化, 因此在静电力的作用下, 被光照亮区域对应的镜面部分将会发生相应的形变. 为了增加变形镜较

\* 总装备部预研基金资助项目(批准号:41321030202)

† 通信作者. Email:xiangdongde@126.com

2006-08-06 收到, 2006-09-22 定稿

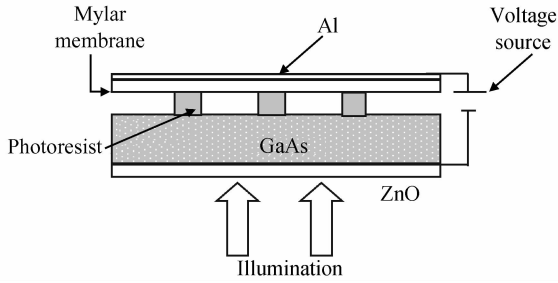


图 1 变形镜的结构示意图

Fig.1 Schematic of deformable mirror

正波前的能力, 栅格状的支撑柱将镜面分为  $4 \times 4$  个部分, 即镜面含有 16 个形变单元. 可变形反射镜各部分的尺寸如表 1 所示.

表 1 反射镜的结构设计

Table 1 Designed dimension for deformable mirror

Thickness of membrane	$2\mu\text{m}$
Diameter of membrane	5.08cm
Space between substrate and membrane	$6\mu\text{m}$
Number of deformable pixel	16
Thickness of coated Al membrane	400nm
Thickness of substrate	0.5mm

### 2.2 反射镜的制作

首先将直径为 50mm 的 GaAs 晶片打磨到 0.5mm 的厚度, 并且在晶片的下表面利用 LPCVD 方法沉淀近红外光几乎全部通过的 ZnO 层, 厚度在  $0.5\mu\text{m}$  左右为宜, 此步骤如图 2(a) 所示. 然后进行一次掩模及光刻, 在 GaAs 晶片的上表面沉淀  $5\mu\text{m}$  厚的栅格状光致抗蚀剂(聚酰亚胺), 从而形成支撑镜面的支撑柱<sup>[2]</sup>, 如图 2(b) 所示. 将带有支撑柱的晶片倒置, 并置于已经被镀铝的聚脂薄膜的上方, 利用重力及热键合<sup>[3]</sup>的方法, 将支撑柱与晶片胶粘在一起, 如图 2(c) 所示. 最后, 再将装置倒置, 并且将电压源连接于铝膜及 ZnO 膜之间, 如图 2(d) 所示.

为了获得镀铝的聚脂薄膜, 首先利用双面胶将  $2\mu\text{m}$  厚的聚脂薄膜, 固定在直径 150mm 铜环上, 此过程需利用吹风机将铜环加热至  $40^\circ\text{C}$ , 以便很好地将两者固定在一起, 然后将固定后的聚脂薄膜放入电子束脱水器中, 以便很好地除掉瓦斯, 最后进行蒸气镀膜(也可以利用 LPCVD 的方法镀膜), 直到聚脂薄膜的上表面堆积一层 400nm 厚的铝膜为止.

### 3 器件理论工作模型

由于镜面各个形变单元之间互不干扰, 因此只

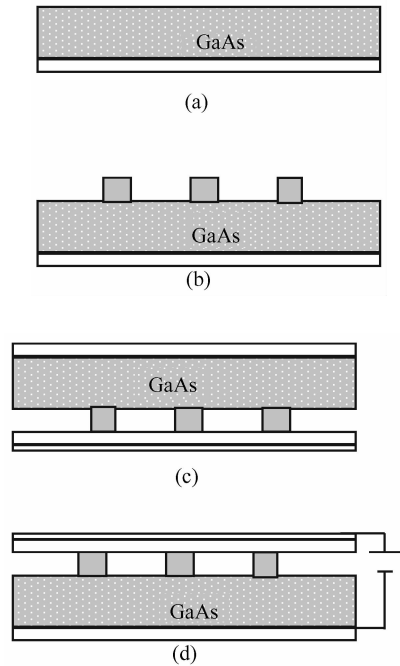


图 2 反射镜加工工艺流程

Fig.2 Fabrication processes of deformable mirror

需要分析单个形变单元的形变原理即可. 图 3 是单个形变单元的工作模型.

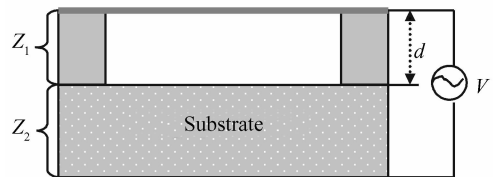


图 3 单个形变单元工作模型

Fig.3 Work model of single pixel

由于在镜面与感光底层之间施加交流电压, 因此在镜面及感光底层的上表面之间构成一个电容器, 其电阻值为  $Z_1$ . 在 GaAs 感光底层上下表面之间构成光敏电阻, 其阻值为  $Z_2$ . 而且  $Z_1, Z_2$  及电压源是串联连接, 如图 4 所示. 为确定电容器阻值  $Z_1$  的大小, 需确定电容器电容  $C_1$  的大小, 为此建立如图 5 所示的坐标系.

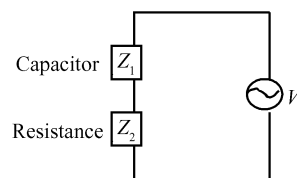


图 4 简化的电路图

Fig.4 Predigestion circuit diagram

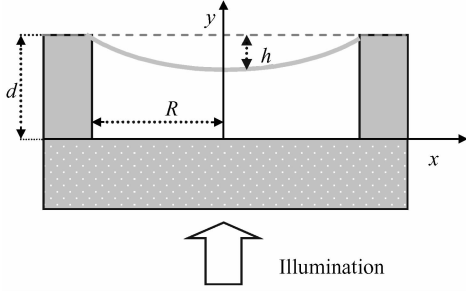


图5 变形镜形变示意图

Fig.5 Deflection chart of deformable pixel

由物理学及几何学可知

$$C \cong \frac{\pi\epsilon_0 R^2}{d} + \frac{\pi\epsilon_0 R^2 h}{2d^2} \quad (1)$$

其中  $R$  为形变单元的半径;  $\epsilon_0$  是真空介电常数;  $d$  为形变前镜面到感光底层上表面的高度;  $h$  为镜面中心点的形变量, 可表示为<sup>[4]</sup>

$$h = \frac{\epsilon_0 R^2 V_1^2}{8Td^2} \quad (2)$$

其中  $T$  为镜面张力;  $V_1$  为镜面与感光底层上表面之间的电压, 若施加于变形镜的总的电压为  $V$ , 则由图3和4可知

$$\Delta h = h - h' = \frac{\epsilon_0^3 R^6 q^2 \mu_n^2 A^2 V^2 L^2 \omega^2 \pi^2 (2n\Delta n + \Delta n^2)}{32T[d^2 q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 + L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4][d^2 q^2 \mu_n^2 n^2 A^2 + L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4]} \quad (6)$$

根据(6)式可知在光照达到饱和前, 形变量  $\Delta h$  与反映光照强度的  $\Delta n$  成二次函数的关系; 形变量  $\Delta h$  随交流电压幅值的增加而增加; 却随交流电压的频率  $\omega$  的增加而减小, 这可以解释为: 当  $\omega$  增大时, 根据  $Z_1$  的表达式, 镜面与感光底层之间的电阻  $Z_1$  将会减小, 因此分得的电压变小, 这样由(2)式可得到形变量  $\Delta h$  会变小的同样结论。

## 4 器件特性

### 4.1 GaAs 的光学特性

为了选择合适的光源作为驱动光源, 我们利用 PEL 9 UV/VIS-NIR 分光光度计, 测得了 GaAs 在红外波段的吸收谱线。由于较短波长的光波容易在 GaAs 的表面被吸收; 而较长波长的光波容易产生一些移动的载流子, 因此我们选择具有中等吸收率的光波作为驱动光源<sup>[5]</sup>。通过吸收谱线图发现, 最佳的驱动光波波长为  $0.89\mu\text{m}$ , 但是目前没有  $0.89\mu\text{m}$  的激光器, 因此我们选用  $0.98\mu\text{m}$  的激光器作为驱动光源。通过实验发现白炽灯具有较宽的波长范围, 若利用会聚透镜及功率在  $50\text{W}$  以上的普通白炽灯, 也可以使镜面产生相应形变。

$$V_1 = V \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

其中  $Z_1 = \frac{1}{j\omega C}$ ,  $C$  为电容器的电容值,  $\omega$  为电压源的频率;  $Z_2 = \rho \frac{L}{A} = \frac{L}{q\mu_n nA}$ ,  $L$  为光敏电阻 (GaAs 晶片) 的厚度,  $A$  为单元光敏电阻的面积,  $q$  为电子的电量,  $\mu_n$  为光敏电阻内载流子迁移率,  $n$  为单位体积内载流子的数目。当光敏电阻被光照亮时载流子的浓度会增加, 此时

$$Z_2 = \frac{L}{q\mu_n (n + \Delta n) A}$$

将  $Z_1, Z_2$  的表达式代入(3)式, 可得光照时  $V_1'$  的表达式

$$V_1' = \frac{V}{1 + [1 + Lj\omega C / q\mu_n (n + \Delta n) A]} \quad (4)$$

将(1)和(2)式代入(4)式, 并且忽略  $\epsilon_0$  的二次项可得

$$|V_1'|^2 = \frac{q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 V^2}{q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 + L^2 \omega^2 (\pi\epsilon_0 R^2 / d)^2} \quad (5)$$

设  $h'$  为没有光照时镜面中心的形变量。由附录的推导可知

### 4.2 变形镜形变量的影响因数

借助标准迈克尔逊干涉仪, 利用  $5\text{mW}$  的 HeNe 激光器作为照明光源, 将可变形镜的镜面作为反射镜, 另一参考镜面由闭环的 PZT 控制, 可以获得任意反射单元镜面的干涉条纹图<sup>[6]</sup>, 如图6所示。

图6(a)为晶体背面无光照时, CCD 获得的单元镜面反射干涉条纹图; 图6(b)表示利用  $50\text{mW}$  激光 ( $980\text{nm}$ ) 照亮晶体背面时, 获得的单元镜面反射干涉条纹图; 图6(c)表示图6(a)和(b)两干涉条纹图的区别。利用整个镜面的干涉条纹图, 借助于 ZYGO 软件我们可以获得整个镜面的三维形貌图<sup>[7]</sup>, 如图7所示。图7(a)表示无光源驱动时的镜形貌图; 图7(b)表示利用  $50\text{mW}$  激光 ( $980\text{nm}$ ), 同时利用透镜, 使得 GaAs 晶体背面部分面积 (对应一个镜面形变单元) 被照明时的镜形貌图; 图7(c)表示在图7(b)的基础上减小交流电压的频率, 所获得的镜形貌。

我们还通过实验验证了偏置电压幅值、光照强度、交流电压频率以及 AC 电压与 DC 电压的比值等参数对可变形反射镜性能的影响, 如图8和9所示。图8(a)表示光的强度与形变量之间的关系, 从

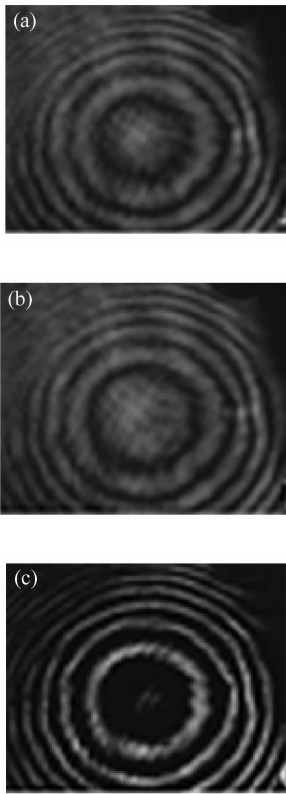


图 6 单元反射镜面的干涉条纹图  
Fig.6 Fringes of the deformable mirror pixel

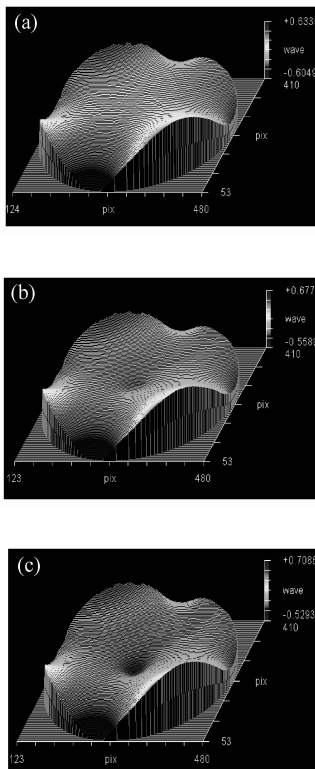


图 7 可变反射镜镜面三维形貌图  
Fig.7 Surface shapes of the DMs membrane

图中可知,在较小的光照强度下,形变量与光强呈一次函数关系,这与我们的理论预测是一致的.图 8 (b)表示在保持交流电压与直流电压幅值的比值不变的前提下,电压总的幅值与形变量之间的关系.从图中可知,形变量与电压幅值的平方成线性关系,与理论推导的结论一致.

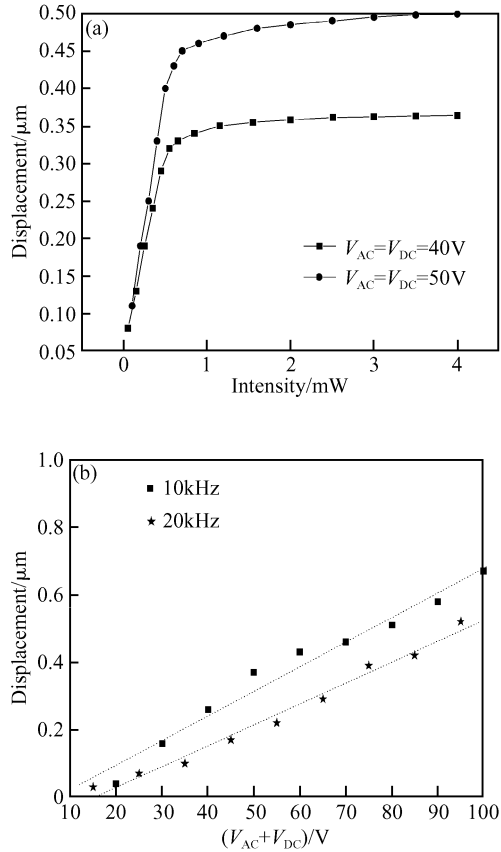


图 8 形变量的影响因素  
Fig.8 Affect factor of displacement

图 9(a)表示保持直流电压的幅值不变,在不同交流电压幅值下,交流电压频率与形变量之间的关系.图 9(b)表示保持交流电压的幅值不变,在不同直流电压幅值下,交流电压频率与形变量之间的关系.从图中可知,改变交流与直流电压幅值的比值 ( $V_{AC} / V_{DC}$ ) 将极大地影响变形镜的形变性能.同时从图中也可知,形变量与交流电压频率之间存在二次减函数的关系(频率越高,形变量越小),符合工作理论模型的推导.由于镜面应避免在共振频率下工作,因此若想增大反射镜的形变量,最优的频率选择应该是在频率远高于镜面材料共振频率的前提下,尽可能降低反射镜的工作频率.

### 5 结论

我们设计、研制了一种新型的利用激光驱动的

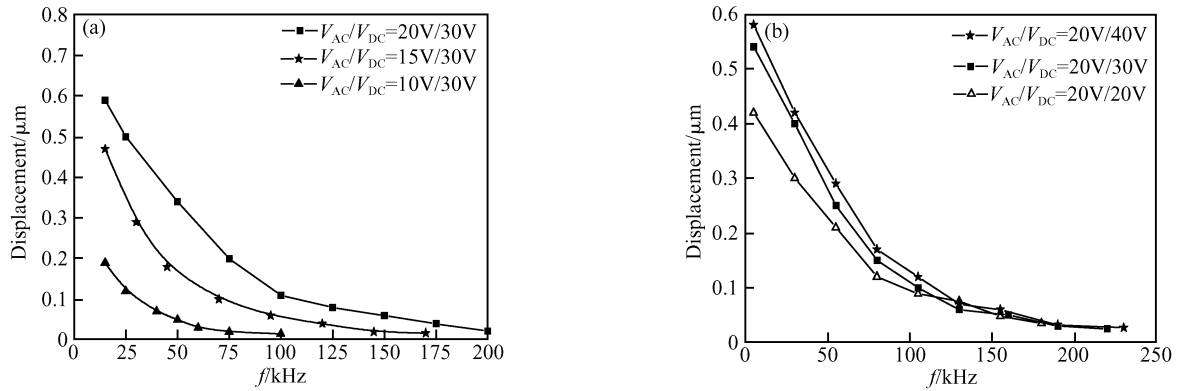


图 9 形变量的影响因素  
Fig.9 Influencing factor of displacement

16 单元可变形反射镜, 其最大形变量可达  $0.85\mu\text{m}$ , 有效反射面积可达  $20\text{cm}^2$ . 介绍了可变形反射镜的制作工艺, 并分析了它的理论工作模型, 根据理论模型, 此装置可以等效为电容与可变电阻的串联电路. 理论分析表明在光强没有达到饱和前, 变形镜的形变量与光强及电压的平方幅值存在线性关系, 与交流电压的频率满足二次函数关系. 我们利用标准迈克逊干涉仪及 ZYGO 软件, 获得的实验数据验证了此理论模型的正确性.

**致谢** 感谢激光国家重点实验室提供的激光器件, 感谢 717 光电研究所提供的表面形貌测试软件.

**参考文献**

[ 1 ] Haji-Saeed B, Kolluru R, Pyburn D, et al. Photoconductive optically driven deformable membrane for spatial light modulator applications utilizing GaAs substrates. *Appl Opt*, 2006, 45(12): 2516  
[ 2 ] Khoury J, Woods C L. Theoretical modeling of the opera-

tional mechanism of a photoconductive MEMS spatial light modulator under AC and DC bias. *Proc SPIE*, 2004, 5437: 288  
[ 3 ] Fu Zhuxi, Sun Xiankai, Zhu Junjie, et al. Effect of lattice mismatch on luminescence of ZnO/Si heterostructure. *Chinese Journal Semiconductors*, 2006, 27(2): 239  
[ 4 ] Yu Hongbin, Chen Haiqing, Zhu Ziming. A novel deformable mirror based on MEMS technology. *Chinese Journal Semiconductors*, 2004, 25(9): 1156 (in Chinese) [余洪斌, 陈海清, 竺子明, 等. 基于 MEMS 技术的一种新型可变形反射镜. *半导体学报*, 2004, 25(9): 1156]  
[ 5 ] Yan Jinliang. Electrostatically actuated micro-electromechanical deformable mirrors. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 551 (in Chinese) [闫金良. 一种微机械变形反射镜. *强激光与粒子束*, 2005, 17(4): 551]  
[ 6 ] Kurczynski P, Dyson H M, Sadoulet D, et al. Fabrication and measurement of low-stress membrane mirrors for adaptive optics. *Appl Opt*, 2004, 43(18): 3573  
[ 7 ] Ling Ning, Guan Chunlin. The development of deformable mirrors. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, 22(1): 15 (in Chinese) [凌宁, 官春林. 变形反射镜的发展. *光电工程*, 1995, 22(1): 15]

**附录 A**

$$C = \frac{\pi\epsilon_0 R^2}{s}d + \frac{\pi\epsilon_0 R^2 h}{2d^2}$$

$$= \frac{\pi\epsilon_0 R^2}{d} + \pi\epsilon_0 R^2 \frac{(\epsilon_0 R^2 V_1/8Td^2)}{2d^2}$$

令  $c = b + aV_1^2$  (A1)

将(A1)式代入(4)式可得

$$V_1 = \frac{V}{1 + [Lj\omega(b + aV_1^2)/q\mu_n(n + \Delta n)A]}$$

$$= \frac{Vm}{m + Lj\omega(b + aV_1^2)} \quad (A2)$$

其中

$$m = q\mu_n(n + \Delta n)A \quad (A3)$$

将(A2)方程两边平方可得

$$|V_1|^2 = \frac{V^2 m^2}{m^2 + L^2 \omega^2 (b + aV_1^2)^2}$$

$$\Rightarrow m^2 |V_1|^2 + L^2 \omega^2 (b + aV_1^2)^2 |V_1|^2 = V^2 m^2$$

$$\Rightarrow m^2 |V_1|^2 + L^2 \omega^2 (a^2 |V_1|^4 + b^2 + 2ab |V_1|^2) |V_1|^2 = V^2 m^2$$

$$\Rightarrow m^2 |V_1|^2 + L^2 \omega^2 a^2 |V_1|^6 + L^2 \omega^2 b^2 |V_1|^2 + 2L^2 \omega^2 ab |V_1|^4 = V^2 m^2$$

$$\Rightarrow L^2 \omega^2 a^2 |V_1|^6 + 2L^2 \omega^2 ab |V_1|^4 + (m^2 + L^2 \omega^2 b^2) |V_1|^2 = V^2 m^2$$

由于  $a, b$  的表达式中含有  $\epsilon_0$  这样极小的物理量, 忽略  $a, b$  的二次项, 上式可以写为

$$\begin{aligned}
(m^2 + L^2 \omega^2 b^2) |V_1|^2 &\cong V^2 m^2 \\
\Rightarrow |V_1|^2 &\cong \frac{V^2 m^2}{(m^2 + L^2 \omega^2 b^2)} \\
&\cong \frac{q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 V^2}{q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 + L^2 \omega^2 (\pi \epsilon_0 R^2 / d)^2} \\
&\quad (A4)
\end{aligned}
\qquad
\begin{aligned}
h &= \frac{\epsilon_0 R^2 q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 V^2}{8 T d^2 [q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 + L^2 \omega^2 (\pi \epsilon_0 R^2 / d)^2]} \\
&= \frac{\epsilon_0 R q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 V^2}{8 T d^2 q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 + 8 T L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4}
\end{aligned}$$

将(A4)代入(2)式可得

无光照时  $\Delta n = 0$ , 此时

$$\begin{aligned}
h' &= \frac{\epsilon_0 R^2 q^2 \mu_n^2 n^2 A^2 V^2}{8 T d^2 q^2 \mu_n^2 n^2 A^2 + 8 T L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4} \\
\Delta h = h - h' &= \frac{\epsilon_0 R^2 q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 V^2}{8 T d^2 q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 + 8 T L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4} - \frac{\epsilon_0 R^2 q^2 \mu_n^2 n^2 A^2 V^2}{8 T d^2 q^2 \mu_n^2 n^2 A^2 + 8 T L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4} \\
&= \frac{8 \epsilon_0^3 R^6 q^2 \mu_n^2 A^2 V^2 T L^2 \omega^2 \pi^2 (2n \Delta n + \Delta n^2)}{[8 T d^2 q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 + 8 T L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4] (8 T d^2 q^2 \mu_n^2 n^2 A^2 + 8 T L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4)} \\
\Rightarrow \Delta h &= \frac{\epsilon_0^3 R^6 q^2 \mu_n^2 A^2 V^2 L^2 \omega^2 \pi^2 (2n \Delta n + \Delta n^2)}{[d^2 q^2 \mu_n^2 (n + \Delta n)^2 A^2 + L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4] (d^2 q^2 \mu_n^2 n^2 A^2 + 8 T L^2 \omega^2 \pi^2 \epsilon_0^2 R^4)}
\end{aligned}$$

## Modeling, Fabrication, and Characterization of a Novel Optically Driven Deformable Mirror\*

Xiang Dong<sup>1,2,†</sup>, Wang Qingling<sup>3</sup>, Zhang Guangyong<sup>4</sup>, and Zhou Lina<sup>2</sup>

(1 Institute of Mathematics & Physics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

(2 Department of Opto-Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(3 Institute of Geophysics and Geomatics Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

(4 State Key Laboratory for Applied Lasers, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper presents a novel deformable mirror driven by a laser. The mirror is composed a 2mm-thick polymeric membrane mirror supported by a 6mm-thick grid of patterned photoresist and a photoconductive GaAs substrate. A very high-frequency AC bias is applied between the membrane and the photoconductive substrate. When the back of the device is illuminated by a laser, the carrier concentration in the GaAs increases. This causes an impedance redistribution between two cascaded impedances, and then the membrane is deformed because of the static electric effect. The working model of the mirror is analyzed, and the design and fabrication of the mirror are also presented. The effects of some operating parameters such as bias voltage and current frequency on the membrane deformation are tested by experiment.

**Key words:** adaptive optics; deformable mirror; optically driven; optical characterization

**EEACC:** 2520E; 4180

**Article ID:** 0253-4177(2007)02-0269-06

\* Project supported by the Advanced Research Foundation of the General Armament Department (No.41321030202)

† Corresponding author. Email: xiangdongde@126.com

Received 6 August 2006, revised manuscript received 22 September 2006