

doi: 10.3788/lop47.032301

一种用于微型光谱仪的光栅光调制器件

王伟^{1,2} 温志渝^{1,2} 张智海^{1,2} 金珠^{1,2} 郭媛君^{1,2} 莫祥霞^{1,2}

(¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044
²重庆大学新型微纳器件与系统技术国家重点学科实验室, 重庆 400044)

摘要 提出了一种改进型的可应用于微型光谱仪的光栅光调制器(GLM), 器件由可动光栅和底层反射层组成。通过静电驱动由多个 GLM 组成的线阵单元, 下拉栅条至不同高度可实现对不同波长光进行开关选通调制。介绍了该器件的工作原理、结构和工艺流程, 利用 Coventor 软件对器件进行建模。通过有限元分析了器件的机电耦合特性, 得到了器件的吸合电压和响应频率, 并得出不同结构参数对器件栅条平坦度的影响关系。仿真结果表明: 通过增加栅条厚度, 改进底电极结构, 且采用减薄的折叠型支撑梁, 能够有效改善光栅面平坦度, 使其较好地实现对光的开关选通。

关键词 光栅光调制器; 微光机电系统; 有限元仿真; 微型光谱仪; 器件结构设计

中图分类号 TP751.1 OCIS 100.3008 230.2090 文献标识码 A

Grating Light Modulator Applied to Novel Micro-Spectrometer

Wang Wei^{1,2} Wen Zhiyu^{1,2} Zhang Zhihai^{1,2} Jin Zhu^{1,2} Guo Yuanjun^{1,2} Mo Xiangxia^{1,2}

(¹Key Laboratory for Opto-Electronic Technology & System, Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400044, China
²National Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract A modified grating light modulator (GLM) device applied to novel micro-spectrometer is proposed, which consists of an upper movable grating and a bottom reflector. When the GLM array is actuated by different voltages, the movable gratings are pulled down to different height, which can modulate lights of different wavelengths. The operating principle, device architecture and fabricated process are introduced, and the device is modeled by using Coventor ware. The electromechanical coupling characteristic is analyzed by the finite element simulation method, the pull-in voltage and response frequency are deduced, and the influence relationship between device architecture and flatness of grating is discussed. The result indicates that flatness of grating can be optimized effectively to achieve better switching modulation feature by increasing the thickness, improving bottom electrode distribution and adopting thinning-folded-beam.

Key words grating light modulator; micro-opto-electro-mechanical system; finite element simulation; micro-spectrometer; architecture design

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-09

基金项目: 重庆市院士基金(CSTC,2008BC3002)资助课题。

作者简介: 王伟(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事微光机电系统方面的研究。E-mail: london202@sina.com

导师简介: 温志渝(1949—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事微系统、微型传感器及微型生化分析仪等方面的研究。

E-mail: wzy@cqu.edu.cn

1 引言

微光机电系统(MOEMS)技术是微机电系统(MEMS)技术和光学技术的进一步融合,具有天生的优势,它可以实现微型光学元件和控制电路的集成,具有可大批量制造,单位成本低,体积微小,响应速度快,性能可靠等优势^[1]。目前,基于MOEMS技术制造的光调制器以其优良的性能获得高速的发展和广泛的应用,典型的有美国德州仪器公司的数字微镜器件(DMD)和硅光机械公司的光栅光阀(GLV)^[2],他们在投影显示、自适应光学、传感器、光通信、微型化光学平台等方面也得到了广泛应用。实现MOEMS技术对光谱、偏振和光空间属性的操作和控制而衍生出的更多更广的功能性开发,已成为该领域的重要应用研发趋势^[3]。由重庆大学提出的基于MOEMS的光栅光调制器(GLM)^[4],利用光栅衍射原理实现光学调制在投影显示技术应用上取得了丰硕研究成果,在此基础上,又提出了一种改进型的光栅光调制器,可作为核心器件应用于一种廉价、小型、方便、快捷的微型光谱仪,通过对不同波长的光进行开关调制来实现光谱检测。本文有针对性地这种改进型的光栅光调制器进行了结构设计以及机电特性的仿真分析。

2 GLM 器件及系统工作原理

基于MOEMS的光栅光调制器采用类似与光栅光阀的衍射工作原理对光进行调制。单像素的光栅光调制器纵剖结构如图1所示,由硅微加工技术构造两层结构,即上层可动光栅和下层反射层,它们等效构成了一个相位光栅^[5]。

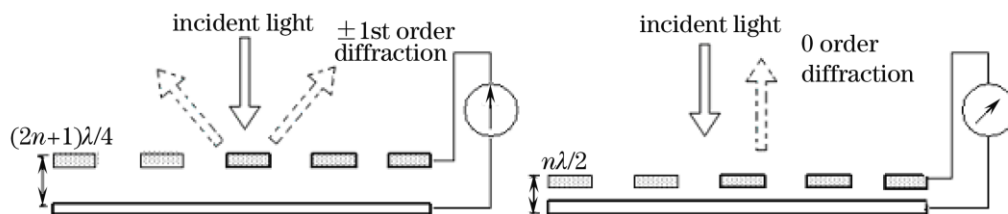


图1 光栅光调制器工作原理
Fig.1 Operating principle of GLM

GLM器件以静电力作为驱动力,通过控制光栅与下反射层之间的距离来改变两者间的光程差,原理如图1所示。当光栅与下电极之间未施加电压时,下反射面与光栅初始距离为 $(2n+1)\lambda/4$, λ 为入射光波长,此时两者一起构成相位差为 π 的相位光栅,衍射能量集中在 ± 1 级,而0级能量几乎为0,将此定义为关态;当上下极板之间施加一定的电压,使得光栅在静电力的作用下下拉 $\lambda/4$ 使得极板间距变为 $\lambda/2$,二者相位差变为0,此时衍射能量集中在0级,而 ± 1 级能量几乎为0,将此定义为开态。由此通过静电电压驱动控制光栅的上下运动来改变相位差,就实现了衍射光的能量在0级和 ± 1 级之间转换,从而也实现了对光的开关状态调制。

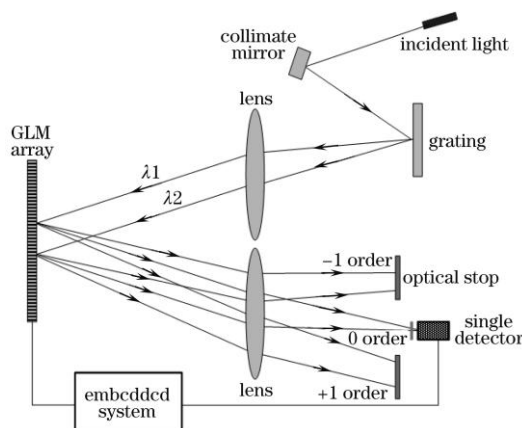


图2 一种微型光谱仪系统原理图
Fig.2 Principle of a novel micro-spectrometer system

将 GLM 应用在一个新型近红外微型光谱仪系统中时,如图 2 所示的系统原理图。待测光经过准直、分光后并通过透镜变为平行光谱带,不同波长的光入射到 GLM 阵列不同单元上,并且每个器件单元上下表面的高度差 h 和下拉高度 $\lambda/4$,都是按每个 GLM 单元位置对应的特定波长来设计。每个 GLM 分别对相应波长的光独立进行开关调制。由系统对称光路可知,所有被选通的不同波长的 0 级衍射光经透镜将会聚一点,当阵列中的各个 GLM 按照时序依次调制时,不同波长的 0 级衍射光也将按照时序依次被选通,并依次落在一个单点探测器上。这样,当所有 GLM 阵列单元逐次完成调制后,探测器也将逐次得到各个波长的光强,即完成了一组光谱信号的探测。

3 结构设计

针对适用于微型光谱仪系统中采用线阵 GLM 的特点及工作波长的要求(近红外波段,中心波长 $\lambda=1\ \mu\text{m}$),对其进行如下设计。单个光栅光调制器的结构如图 3(a)所示,图 3(b)为 GLM 线阵。GLM 主要由硅衬底、底电极、下反射面、双端支撑悬臂梁和可动光栅组成。整体结构采用多晶硅材料并采用表面硅微加工工艺,下反射面与可动光栅表面镀铝膜,且二者间被介质层和空气层隔离。具体结构参数如表 1 所示。这种结构设计能优化光栅面平坦度,提高有效光学面积。

表 1 GLM 器件单元结构参数
Table 1 The structure parameters of GLM unit

Length of grating	500 μm	Grating constant	8 μm	Length of folded beam	272 μm
Width of grating	60 μm	Grating period numbers	8 μm	Width of folded beam	4 μm
Thickness of grating	2.7 μm	Width of borders	4 μm	Thickness of folded beam	0.7 μm
Width of grating strips	4 μm	Space between bottom and grating	2 μm	Displacement by pull in	250 $\mu\text{m}(\lambda/4)$

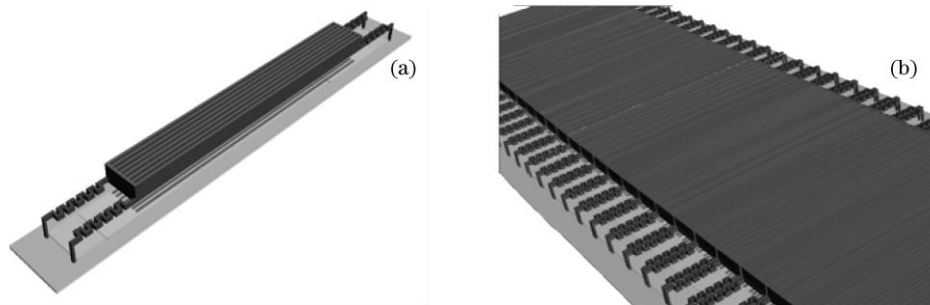


图 3 (a)单个 GLM 器件, (b)GLM 器件线阵
Fig.3 (a)Structure of a single GLM, (b)structure of a GLM array

4 工艺设计

器件采用多晶硅材料的硅微工艺加工。光栅光调制器的主要工艺流程如图 4 所示。首先,在一块 $\langle 100 \rangle$ P 型硅衬底上热氧化一层 300 nm 的二氧化硅并低压化学气相沉积(LPCVD)300 nm 的氮化硅作为绝缘层,再淀积并光刻多晶硅形成底电极;然后利用等离子体化学气相沉积(PECVD)2000 nm 的二氧化硅作为牺牲层,并刻蚀形成 4 个支撑梁固定端通孔(4 个);接着淀积多晶硅并光刻形成可动光栅面和减薄支撑梁,再溅射铝形成下反射面和顶层光栅反射面,最后利用湿法刻蚀掉牺牲层,释放形成悬空的三维器件。

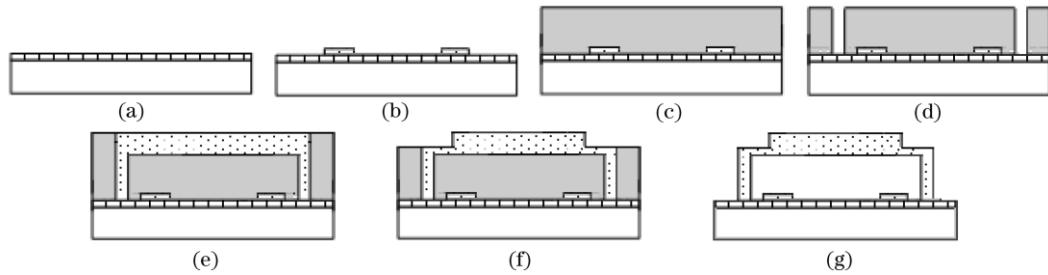


图 4 GLM 加工工艺流程。(a)淀积绝缘层;(b)淀积、光刻底电极;(c)淀积牺牲层;(d)刻蚀通孔;(e)淀积、光刻多晶硅光栅;(f)减薄梁;(g)腐蚀牺牲层释放结构

Fig.4 Fabrication process of GLM.(a)deposition of isolation layer;(b)deposition and lithography of underlying electrode;(c) deposition of sacrificial layer;(d) etch of hole;(e)deposition and lithography of polysilicon grating;(f)thinning beam;(g) etch of the sacrificial layer release structure

5 机电特性分析与仿真优化

在对器件进行机电耦合特性分析中,着重考虑了几个关键参数:吸合电压(PULL-IN)、固有频率、有效光学面积(光栅面平坦度)等。

5.1 理论分析

由于器件是以静电力作为驱动力,就会存在一个吸合问题,因此吸合电压作为静态特性中的重要参数需要着重分析。所谓吸合现象,就是随着施加电压的增加悬臂梁弯曲变形也越大,当电压增加到某个特定值时,若继续增加电压,悬臂梁将不会达到平衡,处于不稳定状态并吸附到下极板,使悬臂梁失去稳定的最小施加电压称为吸合电压 V_{PI} ^[6]。

将器件等效为弹簧-平行板电容模型^[7],光栅面与下电极构成一个电容器,则器件在静态情况下受到回复力和静电力分别为

$$F_s = -K_s z, \quad F_e = \frac{\epsilon_r A V^2}{2(d_{eff} - z)^2}, \quad (1)$$

式中 z , ϵ_r , A , V , d_{eff} 分别为光栅下降的距离、极板间介电常数、光栅面的等效面积、施加在器件上的电压以及上下极板间的等效初始间距; K_s 为悬臂梁的等效弹性系数,可表示为

$$K_s = \frac{4Ewh^3}{l^3} + \frac{2\sigma(1-\nu)wh}{l}, \quad (2)$$

式中 E , σ , ν 分别为材料的杨氏模量、内应力和泊松比; w , h , l 分别为悬臂梁的宽度、厚度及长度。

由吸合条件即器件下拉至上下极板初始间距的 1/3 处(距上极板),则此时吸合电压为

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8K_s d_{eff}^3}{27\epsilon_r A}}, \quad (3)$$

若施加电压超过该电压时,可动光栅可能会吸附到下表面而失效。由于 GLM 器件工作时要下拉的距离为 $\lambda/4$, 因此器件工作时所需的电压为

$$V_o = (4d_{eff} - \lambda) \sqrt{\frac{K_s \lambda}{32A\epsilon_r}}. \quad (4)$$

由于 GLM 是由静电驱动做上下运动,器件的固有频率直接影响其能否正常工作,只有当驱动频率低于器件固有频率时,器件工作时才不会因发生共振而受损。固有频率主要与器件的结构尺寸以及材料性能有关,同时在受到静电力的影响时固有频率会产生变化。

根据等效平板-电容模型, GLM 的等效质量主要集中在中心平板部分,而相对体积较小的支撑梁的质量可以忽略不计。这样,根据弹簧振子模型自由共振频率的计算公式,推导出 GLM 的固有频率为^[8]

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_s}{M}}, \quad (5)$$

式中 M 为可动光栅的等效质量。

5.2 仿真分析

利用 Coventor Ware 软件定义器件工艺过程并绘制 Layout 版图, 建立器件的 3D 模型, 并使用 Manhattan 网格对器件结构进行有限元划分, 因为 Manhattan 网格的有限元法求解在小变形的情况下具有较高精度, 最后在 Analysis 模块中仿真得到器件机电特性。

在机电耦合(Co solve)模块通过有限元仿真分析中得到了器件的位移-电压曲线, 结果如图 5 所示。图 5 所示曲线为可动光栅在不同电压驱动下 Z 方向上的下拉位移。仿真结果表明, 当施加电压为 4 V 左右时, 器件达到吸合状态, 该值即为吸合电压; 而下拉 $\lambda/4$ 高度为 250 μm 左右时, 电压为 2.5 V 左右, 该值即为工作电压。

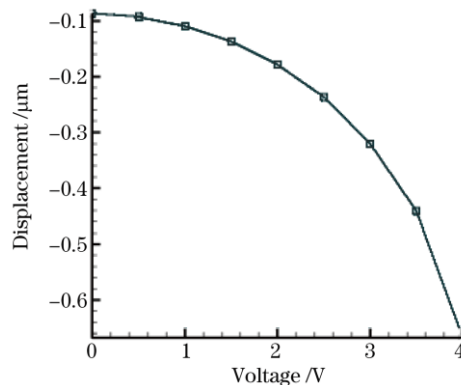


图 5 GLM 器件的位移-电压仿真曲线

Fig.5 Dependence of displacement on voltage by coventor simulation

通过对器件进行模态分析, 当给器件上表面加 0.1 kPa 压强, 利用 Memmech 分析模块仿真得到器件的一阶模态固有频率(基频)为 13.2 kHz, 二阶固有频率为 24.2 kHz, 三阶固有频率为 24.9 kHz。其振型如图 6 所示。由此结果可知, 只要器件的工作频率小于其基频 13.2 kHz, 就不会发生共振。

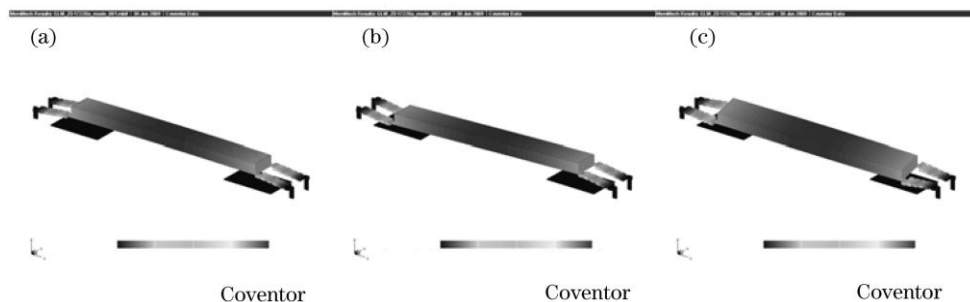


图 6 GLM 的模态分析。(a)一阶; (b)二阶; (c)三阶

Fig.6 Modal analysis GLM. (a) 1st order; (b) 2nd order; (c) 3rd order

5.3 光栅面平坦度仿真分析

GLM 器件作为光衍射器件, 其平坦度对其光学特性有至关重要的影响, 若其平坦度较差, 将直接关系到对光的开关调制效果, 提高光学平坦度在器件设计中尤为重要。对与 MOEMS 器件来说, 器件表面的不平度差一般要求不超过 $\lambda/10$, 因此可将不平度在 $\lambda/10$ 以内的光栅面积作为平坦度的衡量指标针对近红外微型光谱仪系统工作波段要求, 中心波长为 1000 nm, 那么 GLM 器件的不平坦度应不超过 100 nm。

在器件可动光栅下拉过程中, 中间栅条由于电荷集边效应受静电力较大, 而两端由于梁的回复力而抵

消部分静电力^[9]，导致器件中间栅条下拉位移较之两端稍大；并且当悬臂梁和中间栅条的抗弯系数相差不大时，光栅会随梁的弯曲而出现弹性弯曲。在结构设计中主要采用如下3种措施进行优化。

1) 改善梁结构：增大悬臂梁长度并减薄，降低弹性系数，使其柔性增加。但考虑到增加梁长会影响器件的响应频率即开关速度，加之尺寸限制，折衷考虑采用折叠梁结构。从图7所示的仿真对比结果中可看出，图7(a)所示为直梁结构，栅条淀积厚度为1500 nm，在5 V电压驱动时栅条呈吊床型畸变，显然已经吸合，几乎无平坦度。图7(b)所示为采用了折叠梁结构且折叠梁等效增长172 μm ，最大下拉高度为1.6 μm ，在50 nm不平坦度范围内的光栅面积占38%，100 nm不平坦度范围内占43%左右，平坦度较之前有明显改善。

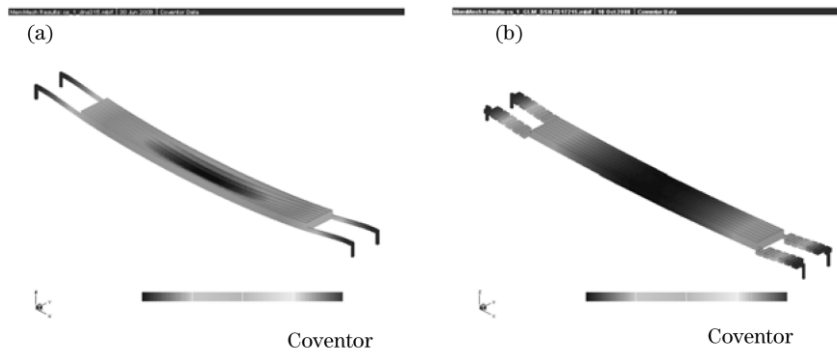


图7 改善支撑梁前后仿真结果对比。(a)直梁结构；(b)折叠梁结构
Fig.7 Comparison of simulation results. (a) straight beam structure; (b) folded beam structure

2) 改善底电极分布：由于电荷集边效应^[10]，可动栅条与下电极在相同距离条件下，中间栅条积累的电荷高于边缘栅条；加之支撑梁的应力共同导致中间受力过大，下拉位移大于两端，因此若采用分布式下电极，使双电极由杠杆作用力双端下拉可动光栅，这样可以减少下拉栅条中间与两端之间的位移差，提高平坦度。由图8的仿真对比结果可以看到：在相同驱动电压情况下采用分布式电极，光栅最大下拉高度变为0.8 μm ，在50 nm不平坦度范围内光栅面积占46%，而100 nm范围内占70%。

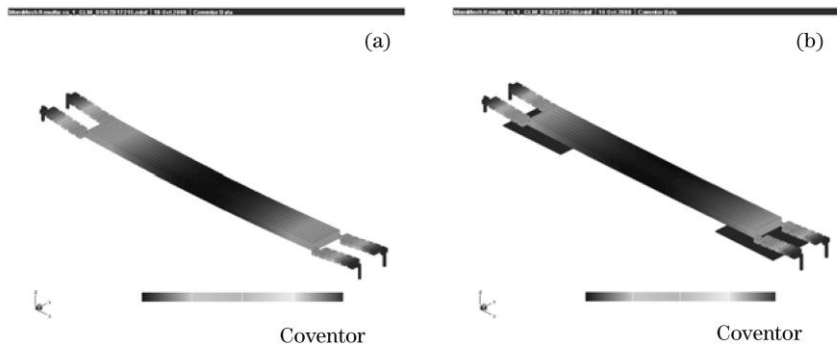


图8 改善电极前后仿真结果对比。(a)单电极；(b)分析式电极
Fig.8 Comparison of simulation results. (a) single electrode; (b) distributed electrodes

3) 增加光栅厚度：由于栅条下拉时，悬臂梁提供的回复力越大等效弹性系数越大，使得光栅面呈弯曲形，减小了有效光学面积。如果增加光栅面厚度以提高其刚度，可防止其因下拉而引起弹性弯曲，从而提高平坦度。在图9仿真对比结果中可看到，图9(a)结构中光栅淀积厚度增至2.0 μm ，加5 V驱动电压时光栅最大下拉0.77 μm ，不平坦度50 nm范围内的光栅面积占52%，不平坦度100 nm范围占72%，较淀积厚度1.5 μm 有所优化。图9(b)所示淀积厚度为2.7 μm ，最大下拉高度为0.62 μm ，不平坦度50 nm范围内光栅面积占71%，而100 nm范围内则到98%以上，可见该结构极大地优化了有效光学面积。

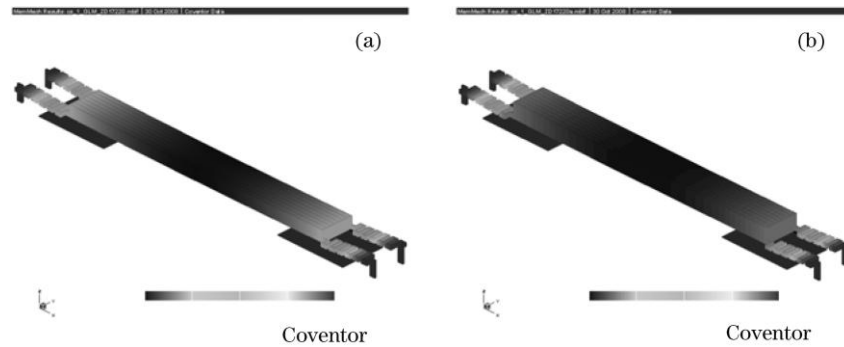


图9 增加淀积厚度前后仿真结果对比。(a)淀积厚度 $2.0\ \mu\text{m}$; (b)淀积厚度 $2.7\ \mu\text{m}$
Fig.9 Comparison of simulation results. (a) deposit thickness of $2.0\ \mu\text{m}$; (b) deposit thickness of $2.7\ \mu\text{m}$

仿真对比结果表明, 以上3种措施在一定程度上优化了光栅平坦度, 且这3种措施是相互影响的。增加光栅的厚度与减薄梁处理是等效的, 都是提高光栅的刚度, 降低梁的弹性系数; 增加光栅厚度和改善电极分布会使驱动电压增加, 而折叠增加梁长度并减薄处理可降低弹性系数以减小驱动电压。同时光栅面平坦度又与驱动电压大小有关, 电压越大器件形变越明显。以上仿真中均用 $5\ \text{V}$ 电压下拉, 光栅基本在吸合状态, 而工作电压是要小于吸合电压的, 因此在除去工艺过程中应力形变因素影响外, 器件平坦度会比较理想。

6 结 论

基于 MOEMS 的光栅光调制器作为核心器件应用于一种微型光谱仪系统, 可使仪器变得重量轻、体积小、使用便捷、可集成化批量制造、成本低廉。针对适用于微型光谱仪系统的工作特点及要求, 对 GLM 进行了设计优化与分析, 通过对器件的静态特性和动态特性的仿真分析, 得到器件的机电特性参数, 如吸合电压、固有频率; 同时也得出器件结构对光栅面平坦度的影响: 通过增加栅条厚度, 改进底电极结构, 采用减薄的折叠型支撑梁, 能够有效改善光栅面平坦度。

参 考 文 献

- Zhang Zhihai. Study on Some Key Technologies of MOEMS-based Grating Moving Light Modulator Array [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007. 1~2
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, 2007. 1~2
- D. M. Bloom. The grating light valve: revolutionizing display technology[C]. *SPIE*, 1997, **3013**: 165~171
- Chen Feifan, Yin Ling, Li Yunlong *et al.*. Review and prospects of research on micro-opto-electro-mechanical system[J]. *Microfabrication Technol.*, 2002, **20**(3): 1~7
陈非凡, 殷玲, 李云龙等. 微光机电系统(MOEMS)的研究现状及展望[J]. 微细加工技术, 2002, **20**(3): 1~7
- Zhang Jie, Huang Shanglian, Yan Xu *et al.*. Optimization and analysis for structural parameters of grating moving light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1121~1126
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[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1121~1126
- Yan Xu, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Grating light modulator based on MOEMS[C]. 11th Commission for Optoelectronics Technology & Systems. 2005. 795~799
闫许, 黄尚廉, 张洁等. 基于 MOEMS 光栅平动式光调制器[C]. 第十一届光电技术与系统会议. 2005. 795~799
- Joseph I. Seeger, Selden B. Craary. Stabilization of electrostatically actuated mechanical devices[C]. International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, Chicago, America. 1997. 16~19
- M. A. Michalick, D. E. Sene, V. M. Bright. Advanced modeling of micromirror devices[C]. Proceedings of the International Conference on Integrated Micro/Nanotechnology for Space Applications, NASA & Aerospace Corp, 1995. 214~229
- Gary Keith Fedder. Simulation of Microelectromechanical Systems[D]. Berkeley: California University, 1994. 67~156
- Yan Xu. Structural Parameter Analysis and Experiment of MEMS-based Grating Moving Light Modulator[D]. Chongqing: University of Chongqing, 2006. 18~19
闫许. 基于mems光栅平动式光调制器结构参数分析与实验[D]. 重庆: 重庆大学. 2006. 18~19
- Adirak Kanchanaharuthai, Adisorn Tuantranont. Feedback controller design with D stability in silicon-micromachined piston micromirrors[C]. *IEEE*, 2002, **2**: 936~940