

文章编号: 0253-2239(2007)09-1565-5

基于微机电系统光栅平动式光调制器实验和优化设计*

张 洁 黄尚廉 张智海 孙吉勇 史玲娜 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: 基于微机电系统(MEMS)的光栅平动式光调制器(光栅平动式光调制器)调制性能的实验研究关系到其进一步应用。设计了光栅平动式光调制器的相干光学信息处理系统实验方案, He-Ne 激光器出射的光束经扩束器和准直透射后成为平行光入射光栅平动式光调制器, 被测光栅平动式光调制器放置在相干光学信息处理系统的输入面, 滤波器在频谱面上, 显微镜放大像面上的信号, 经 CCD 在计算机上记录存储; 实验结果和理论分析吻合。对光栅平动式光调制器进行方案优化, 将可动光栅边框和悬臂梁表面处理成不反光, 使可动光栅和下反射镜构成的整个反射面为光栅周期的整数倍。经理论计算, 在光栅周期为 $8\ \mu\text{m}$, 光栅占空比为 0.5, 光栅边距为 $2\ \mu\text{m}$, 周期数为 6 的条件下, 光栅平动式光调制器图像填充率为 74.67%, 光学效率为 81.06%, 衬比度大于 5000:1。

关键词: 信息光学; 光栅; 相干光学信息处理; 光调制器

中图分类号: TN761 文献标识码: A

Experiments and Structural Optimization of Micro-Electro-Mechanical System-Based Grating Moving Light Modulator

Zhang Jie Huang Shanglian Zhang Zhihai Shun Jiyong Shi Lingna Zhu Yong

(the Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of the Education Ministry,

Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract: The experimental research for micro-electro-mechanical system (MEMS)-based grating moving light modulator (GMLM) is important for its further applications. Interference optical signal processing system with GMLM module was carried on, with He-Ne laser as light source, filter placed on the frequency spectrum plane, and microscope and CCD placed on the imaging plane and used for magnifying and recording imaging. The laser beam from He-Ne laser was incident on the GMLM as parallel light after passing a beam expander and a collimating lens, the GMLM is placed on the input plane of the interference optical signal processing system and the result is consistent to theoretical result. The optimization of GMLM model was achieved, the grating frame and cantilevers are processed as non-reflective, and as a result the total reflective surface composed of the movable grating and the nether mirror is integer multiple of grating period. The optimized model was theoretically analyzed in details by scalar diffraction theory, with optical efficiency of 81.06%, filling factor of 74.67% and contrast ratio higher than 5000:1 in the condition of grating period of $8\ \mu\text{m}$, duty ratio of 0.5, grating frame of $2\ \mu\text{m}$, and period number of 6.

Key words: information optics; grating; coherent optical information processing; light modulator

1 引 言

随着微机电系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)技术的成熟, 基于微机电系统的光调制器已成为当前研究的热点, 应用于投影显示等

领域^[1~4]。重庆大学提出的基于微机电系统的光栅平动式光调制器(Grating moving light modulator, GMLM)^[5,7], 是基于相位光栅的原理, 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

* 重庆市院士基金(8883)和国家自然科学基金(60578023)资助课题。

作者简介: 张 洁(1980-), 女, 四川人, 博士研究生, 主要从事微机电系统器件及系统等方面的研究。

E-mail: zhangjie@cqu.edu.cn

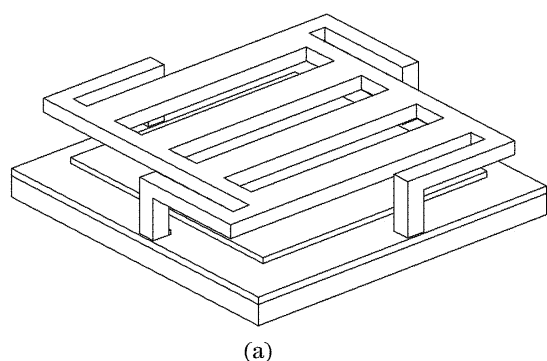
导师简介: 黄尚廉(1936-), 男, 四川人, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事光学工程、仪器技术与科学、微机电系统器件及系统等方面的研究。E-mail: slhuang@cqu.edu.cn

收稿日期: 2006-12-22; 收到修改稿日期: 2007-04-04

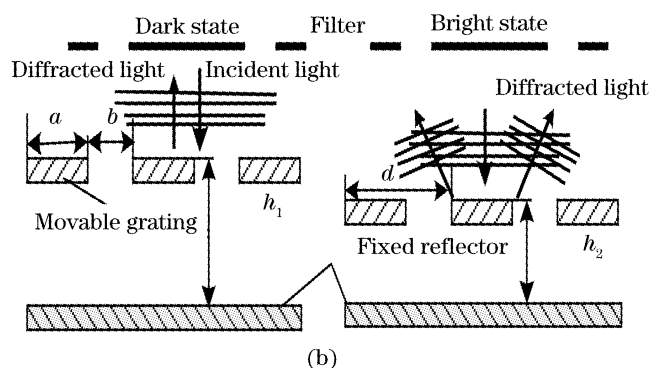
制。加工工艺较数字微镜器件 (Digital micro-mirror devices, DMD) 简单, 同时解决了光栅光阀 (Grating light valve, GLV) 难于形成面阵的缺点。光栅平动式光调制器主要面向显示, 其调制作用显得尤其重要。本文在相干光学信息处理系统中对光栅平动式光调制器调制作用进行实验研究和结构优化设计, 为后续器件再加工提供理论依据。

2 光栅平动式光调制器结构

光栅平动式光调制器结构如图 1(a) 所示^[5,6], 主



(a)



(b)

图 1 光栅平动式光调制器结构(a), 光学原理(b)

Fig. 1 Structure (a), optical principle (b) of grating moving light modulator

3 实 验

设计的相干光学信息处理实验系统如图 2 所示。

由 He-Ne 激光器出射的光经扩束器和准直透射后成为平行光; 被测光栅平动式光调制器放置在系统的输入面, 即物面 (傅里叶透镜 5 的前焦面); 傅里叶透镜 5 的后焦面和傅里叶透镜 6 的前焦面重合 (频谱面), 在该面上放置光阑; 显微镜放置在系统的输出面上, 即像面 (傅里叶透镜 6 的后焦面), 像面上的成像通过显微镜放大, CCD 传到计算机中记录存储。

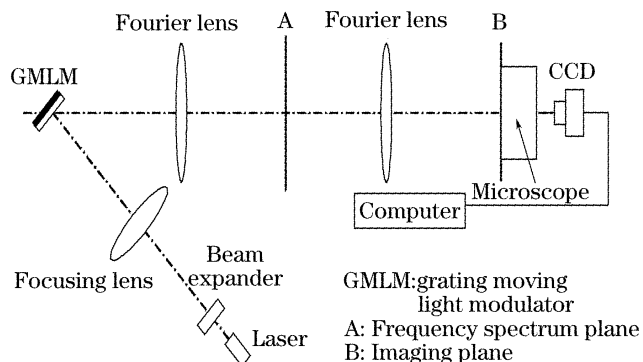


图 2 测量光栅平动式光调制器光调制性能的实验光路

Fig. 2 Experimental setup of the measurement for optical modulation characteristic of grating moving light modulator

要包括一个可动光栅, 下反射镜和支撑可动光栅做上下位移的蟹型悬臂梁。基本光学原理如图 1(b) 所示, 当不加激励的时候, 可动光栅上表面和下反射镜的距离为 $\lambda/4$ 的偶数倍 (λ 为入射到光栅平动式光调制器的光波波长), 根据衍射原理, 衍射能量集中在 0 级; 加上激励后, 可动光栅在静电力作用下向下反射镜的方向平行移动, 当可动光栅上表面和下反射镜的距离为 $\lambda/4$ 的奇数倍, 衍射能量集中在 ± 1 级。当滤出 ± 1 级或者 0 级衍射光, 可以实现对光能量的调制。

根据光栅平动式光调制器像元和 CCD 像元大小选择合适的两个傅里叶透镜的焦距之比和显微镜的放大倍数, 做到像元之间的一一对应。将光栅平动式光调制器放置在光具座上, 调整激光入射角度和光栅平动式光调制器倾斜角度, 使得光栅平动式光调制器衍射能量进入傅里叶透镜。由于采用的显微镜是立式的, 需要改变光路, 在像面上加反射镜, 使像面上的能量进入显微镜, 同时调整反射镜位置, 使得光栅平动式光调制器像面中心正好在 CCD 中心。

经过两次投片, 制作的光栅平动式光调制器实验样品如图 3(a) 所示。在频谱面上滤出 1 级衍射谱时像面上的能量分布如图 3(b) 所示, 近似周期变化。

进行图像信号处理, 得到的实验曲线如图 4(a) 所示。根据文献 [7] 的测试结果, 高度 $h = 1.1313 \mu\text{m}$ (不满足波长的整数倍), 入射光波长 $0.6328 \mu\text{m}$, 入射角 45° , 得到的理论曲线如图 4(b) 所示。实验结果与理论分析比较吻合, 但是实验结果中出现毛刺。可能有如下几方面的原因:

- 1) 器件本身的加工工艺带来表面光洁度的影响;
- 2) 实验装置的影响, 如采用的 He-Ne 激光器, 是高斯光束, 而理论上是采用均匀光束进行仿真;

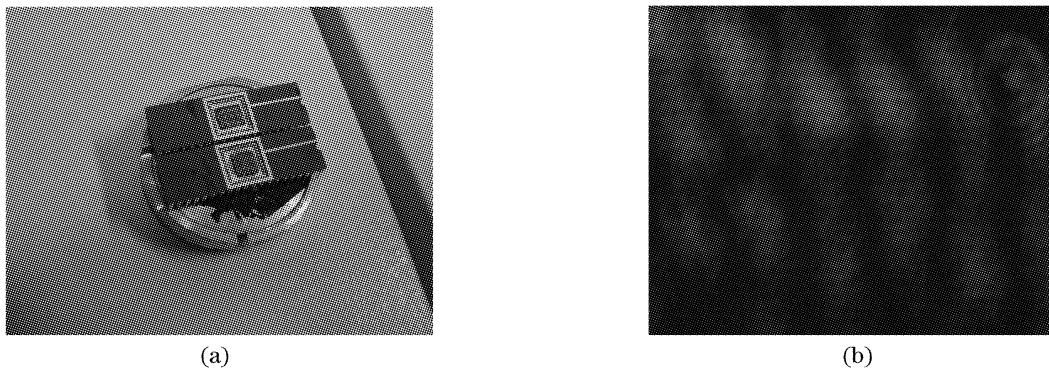


图 3 测试样品及能量分布图。(a)光栅平动式光调制器测试样品，(b)滤出±1 级谱时像面光能量分布

Fig. 3 Tested sample and the light distribution. (a) Sample to be tested by grating moving light modulator, (b) light-energy distribution on the imaging plane when the 1st order spectrum is filtered out

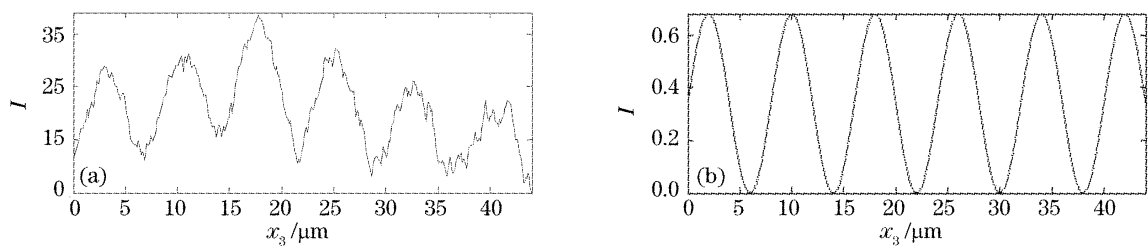


图 4 沿光栅周期方向的光栅平动式光调制器像素像面光强度。(a) 实验曲线，(b) 理论曲线

Fig. 4 Intensity in image plane along grating moving light modulator grating period direction. (a) Experimental result, (b) theoretical result

3) 采用反射镜进行光路的改变,对成像质量会有一定的影响;

4) 由于器件结构在中的边框和悬臂梁的影响等。

4 优化设计

分析表明^[6],当边框和悬臂梁表面镀上反射膜

时,结构方案如图 5(a),光栅平动式光调制器的衍射图像存在高次谐波;考虑到边框、悬臂梁、以及光栅长度的非整数倍光栅周期,设计了方案 2,如图 5(b)所示,通过把边框和悬臂梁处理成不反光,同时下反射面在工艺上进行处理,使得整个反射面部分为光栅周期的整数倍。

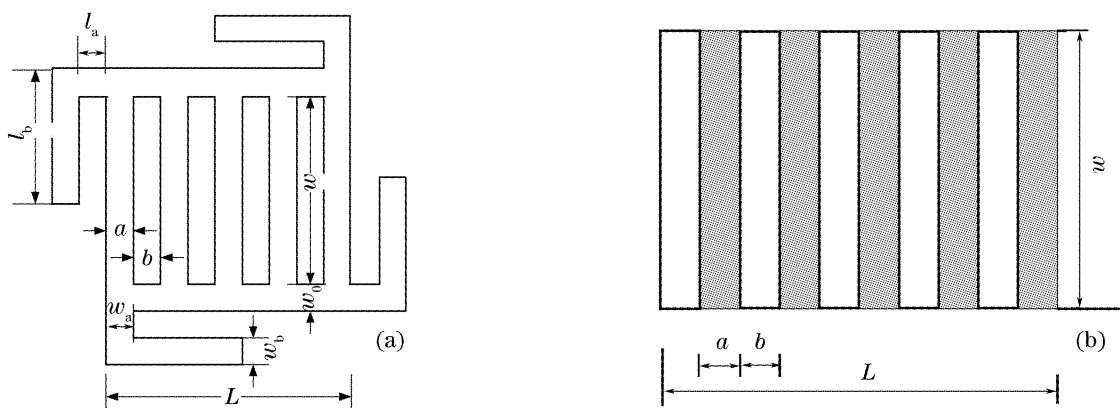


图 5 2 种方案。(a) 方案 1, (b) 方案 2(改进方案)

Fig. 5 Two models. (a) Model 1, (b) model 2 (developed model)

对 2 种方案进行仿真分析,结果如图 6 所示。当可动光栅和下反射镜之间的距离产生 π 的奇数倍相位差 $[\phi=(2n+1)\pi]$ 时,方案 1 仿真结果光能量转移到±1 级,0 级还有光能量,如图 6(a)所示;图 4 的实验结果出现毛刺,与图 6(a)、图 6(b)出现的高

次谐波有关。方案 2 两种状态下的衍射能量如图 6 (c)和图 6(d),光能量主要都集中在±1 级,高次谐波少。

当光栅平动式光调制器应用于显示领域时,图像填充率、光能利用率和衬比度都是重要参量,为此

对 2 种方案在不同结构参量情况下进行比较分析。

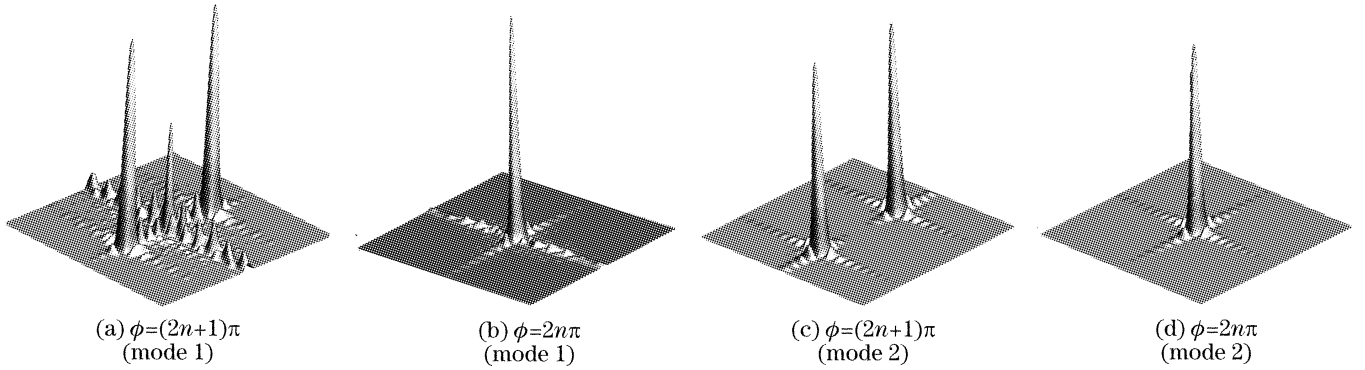


图 6 2 种方案衍射光能量分布图。(a) $\phi=(2n+1)\pi$ (方案 1), (b) $\phi=2n\pi$ (方案 1), (c) $\phi=(2n+1)\pi$ (方案 2), (d) $\phi=2n\pi$ (方案 2)

Fig. 6 Diffracted-light intensity distribution of two models. (a) $\phi=(2n+1)\pi$ (model 1), (b) $\phi=2n\pi$ (model 1), (c) $\phi=(2n+1)\pi$ (model 2), (d) $\phi=2n\pi$ (model 2)

方案 1 的图像填充率为 $\frac{L^2}{(L+2\omega_b+2l_a)^2}$, 方案 2 的填充率为 $\frac{L \cdot \omega}{(L+2\omega_b+2l_a)^2}$ 。可见, 要获得比较高的图像填充率, 需要增加光栅常量和光栅线数, 降低边框的宽度。

衬比度 V 定义为光栅平动式光调制器在两种状态时, 像面上能量之比。光能利用率 η 主要从衍射能量的角度来考虑, 只考虑器件本身的光能利用

率, 定义为亮态时像面的光能量比上总的光能量, 忽略反射、散射等带来的光能量损失。可动光栅的光栅常量 d 不同时, 光能利用率和衬比度如表 1 所示; 可动光栅占空比(定义占空比 $e=a/d$)不同时, 光能利用率和衬比度的比较如表 2 所示; 可动光栅边框宽度不同时, 光能利用率和衬比度如表 3 所示; 可动光栅线数 m 不同时, 光能利用率和衬比度如表 4 所示。

表 1 可动光栅常量 d 与光能利用率 η 、衬比度 V 关系

Table 1 Relationship between movable grating constant d and optical efficiency η , contrast V

Performance parameter		$d / \mu\text{m}$				
		4	6	8	12	
Collecting 1st-order diffraction	η	Model 1	0.4687	0.5523	0.5936	0.6447
		Model 2	0.8106	0.8106	0.8106	0.8106
	V	Model 1	38.40	65.85	99.74	148.6
		Model 2	8.064×10^{31}	1.025×10^{32}	9.175×10^{31}	3.994×10^{31}

表 2 可动光栅占空比 e 与光能利用率 η 、衬比度 V 关系

Table 2 Relationship between grating occupation ratio e and optical efficiency η , contrast V

Performance parameter		$d / \mu\text{m}$				
		4	6	8	12	
Collecting 1st-order diffraction	η	Model 1	0.3731	0.5289	0.5936	0.2278
		Model 2	0.5589	0.7526	0.8106	0.2800
	V	Model 1	243.5	139.7	99.74	36.30
		Model 2	6.815×10^{31}	8.581×10^{31}	9.175×10^{31}	1.156×10^{31}

表 3 可动光栅边框宽度 ω_0 与光能利用率 η 、衬比度 V 关系

Table 3 Relationship between movable grating frame ω_0 and optical efficiency η , contrast V

Performance parameter		$d / \mu\text{m}$				
		4	6	8	12	
Collecting 1st-order diffraction	η	Model 1	0.6389	0.5936	0.5499	0.5079
		Model 2	0.8106	0.8106	0.8106	0.8106
	V	Model 1	107.4	99.74	92.40	85.34
		Model 2	9.716×10^{31}	9.175×10^{31}	8.624×10^{31}	8.064×10^{31}

表 4 光栅线数 m 与光能利用率 η 、衬比度 V 关系Table 4 Relationship between period number m and optical efficiency η , contrast ratio V

Performance parameter		$d/\mu\text{m}$				
		4	6	8	12	
Collecting 1st-order diffraction	η	Model 1	0.4227	0.5936	0.6230	0.5662
		Model 2	0.8106	0.8106	0.8106	0.8106
	V	Model 1	22.05	99.74	544.5	4.365×10^3
		Model 2	9.175×10^{31}	2.667×10^{31}	8.064×10^{31}	3.994×10^{31}

从光能利用率和衬比度来看,方案 1 由于边框和悬臂梁的影响,光能利用率和衬比度低于方案 2;方案 2 是一种优化方案,构成光栅的长度为 $L=md$,类似理想矩形相位光栅。要得到高衬比度和光能利用率,应采取方案 2,同时增加光栅常量、光栅线数,减小边框。

根据方案 2,有望从理论上达到高的衬比度和光能利用率;对于图像填充率,可以在保证悬臂梁支撑可动光栅的电学性能前提下,减小悬臂梁和边框的尺寸;为光栅平动式光调制器的进一步发展和有望代替现有的基于微机电系统的微显示器件提供了有力的依据。方案 2 将是下一步的加工方案。

5 结 论

对光栅平动式光调制器测试样品进行了光学信号处理实验,与理论模型曲线相符合,验证了理论模型正确性。从而将理论、仿真与实验统一起来。

对光栅平动式光调制器进行方案比较和优化,可动光栅边框和悬臂梁表面进行不反光处理,同时使可动光栅和下反射面构成整数倍光栅周期。经理论计算,在 $d=8\ \mu\text{m}$, $e=0.5$, $w_0=2\ \mu\text{m}$, $m=6$ 的条件下,优化方案的图像填充率为 74.67%,光学效率 81.06%,衬比度大于 5000:1。

参 考 文 献

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

modulator[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2003, **24**(3): 160~164 (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[J]. 半导体光电, 2003, **24**(3): 160~164

2 Wu Yi, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Electromechanical characteristics analysis for the reflector-moveable grating light modulator[J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, **16**(14): 1251~1253 (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[J]. 中国机械工程, 2005, **16**(14): 1251~1253

3 Huang Shanglian, Yan Xu, Zhang Jie *et al.*. Optical characteristic analysis of grating moving light modulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 749~753 (in Chinese)

黄尚廉,闫 许,张 洁. 光栅平动式光调制器光学特性分析[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(5): 749~753

4 Zhang Jie, Huang Shanglian, Fu Hongqiao *et al.*. Optical characteristics analysis and simulation of grating light valve[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1452~1456 (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[J]. 光学学报, 2005, **25**(11): 1452~1456

5 Zhang Jie, Huang Shanglian, Yan Xu *et al.*. Optical performance analysis and simulation of reflector moving grating light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 824~827 (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[J]. 光子学报, 2006, **35**(6): 824~827

6 Zhang Jie, Huang Shanglian, Fu Hongqiao *et al.*. Structural analysis and optimization of grating moving light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1121~1126 (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[J]. 光学学报, 2006, **26**(8): 1121~1126

7 Zhang Jie, Huang Shanglian, Zhang Zhihai *et al.*. A wavelength scanning method for measuring micro distance of grating moving light modulator[J]. *Chin. J. Sensors and Actuators*, 2006, **19**(5): 1764~1767 (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[J]. 传感技术学报, 2006, **19**(5): 1764~1767