

光栅光调制器的表面弯曲度分析及实验

史玲娜^{1,2} 黄尚廉¹ 孙吉勇¹ 张智海¹ 张洁^{1,2} 韦玮¹

(¹重庆大学光电工程学院, 教育部光电技术与系统重点实验室, 重庆 400030)
(²重庆交通大学理学院, 重庆 400074)

摘要 讨论了二维光栅光调制器阵列的表面弯曲度对衍射光学特性的影响。利用实测的表面结构数据建立了阵列模型, 利用 Matlab 软件计算了不同弯曲度对频谱面上衍射光强的分布影响, 得到了弯曲度与对比度之间的关系。结果表明暗态时光栅面的弯曲度对成像对比度的影响很大, 如果将光栅面的中心弯曲度控制在 0.1λ 以内, 在像面上将获得 1000 以上的对比度。并通过实验动态显示器件的明暗态调制, 得出减少光栅面弯曲度的优化方案。

关键词 微光机电系统; 光栅光调制器; 衍射; 表面弯曲度; 对比度

中图分类号 TB133 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092904.0869

Analysis and Experiment of Surface Bending of Grating Light Modulator

Shi Lingna^{1,2} Huang Shanglian¹ Sun Jiyong¹ Zhang Zhihai¹ Zhang Jie^{1,2} Wei Wei¹

(¹Key Lab of Opto-Electronic Technology and Systems, Ministry of Education, College
of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)
(²College of Science, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract The effect the diffractive optical characteristic by the surface bending of two-dimensional grating light modulator (GLM) is discussed. Based on the measured surface structure data, an array model was built, and the effect on diffractive light distribution in spectrum plane with different bendings was calculated by Matlab software. The relation between bending and contrast was deduced. The result indicates that the surface bending can affect the image contrast greatly in condition of darkness. If the bending in center is reduced less than 0.1λ , the contrast will be larger than 1000. An optimized scheme is proposed for reducing the bending of the grating. Through a dynamical experiment which shows the modulation effect of brightness and darkness.

Key words micro-optoelectro-mechanical system (MOEMS); grating light modulator; diffraction; surface bending; contrast

1 引言

随着微光机电系统 (MOEMS, Micro-opto-electro-mechanical systems) 技术的迅猛发展, 利用微光机电系统技术应用于投影显示已经成为当前研究的热点^[1~6]。其中最具代表性的是德州仪器公司的数字微镜 (DMD, Digital micro-mirror devices)^[7]

和斯坦福大学的 Bloom 等人提出的光栅光阀 (GLV, Grating light valve)^[8]。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。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

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-10-07

基金项目: 国家自然科学基金 (60708017)、重庆市院士基金 (CSTC, 2008BC3002) 和全国博士后基金 (20070410773) 资助课题。

作者简介: 史玲娜 (1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为信息获取和处理技术。E-mail: sln1013@163.com

导师简介: 黄尚廉 (1936—2008), 男, 教授, 中国工程院院士。从事光电技术及系统、仪器科学与技术的研究, 包括光纤通信与传感、智能结构系统、微光机电系统 (MOEMS)、企业信息化等。E-mail: slhuang@cqu.edu.cn

复杂性和装配难度。重庆大学^[9]提出了一种面阵型光栅光调制器,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。相关文献^[10~12]对光栅光调制器的光学调制特性进行了详细的分析和研究,然而所有分析都建立在光栅光调制器表面是平整的假设上,在实际的加工过程中,由于材料性能和工艺条件限制,器件表面可能存在弯曲等不平整的情况,这将会影响到光栅光调制器的调制特性,进而影响到显示效果。因此有必要对光栅光调制器的表面平整度对光学调制效果的影响进行分析,有利于后续的设计加工和结构优化。

本文首先从理论上分析了理想情况下假设器件表面平整时的二维光栅光调制器的衍射特性,接着

根据测试光调制器的表面形貌拟合表面弯曲度方程,通过 Matlab 软件分析计算在光栅面弯曲时光栅光调制器的衍射特性以及弯曲程度对调制效果的影响,得出能满足显示要求的弯曲度的容忍范围,并通过实验分析实际器件的弯曲情况,对光栅光调制器的加工设计提出建设性意见。

2 理论分析

图 1 是加工得到的二维光栅光调制器阵列,其中单个器件主要包括一个上层的可动光栅面和下层的反射面。光射到调制器的上下表面被反射后,发生衍射。在忽略器件周围的边框和支撑梁对反射的影响后,器件阵列的透过率函数可表示为

$$t(x, y) = t_s(x, y) \otimes \left[\frac{1}{D_x} \text{comb}\left(\frac{x}{D_x}\right) \cdot \frac{1}{D_y} \text{comb}\left(\frac{y}{D_y}\right) \right] \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{N_x D_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{N_y D_y}\right), \quad (1)$$

其中

$$t_s(x, y) = \left(\sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left[\frac{x+md}{a}\right] + \exp\left(\frac{j4\pi h}{\lambda}\right) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x+md+d/2}{a}\right) \right) \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W}\right), \quad (2)$$

表示单个器件的透射率函数,式中 a 为光栅条的宽度, d 为光栅常数, h 为下反射镜和可动光栅上表面之间的光程差, L 为调制器沿光栅周期方向的宽度, W 为光栅条的长度, D_x 和 D_y 分别为单个光栅在 x 和 y 方向的尺寸, N_x 和 N_y 分别表示在 x 和 y 方向的调制器的个数。

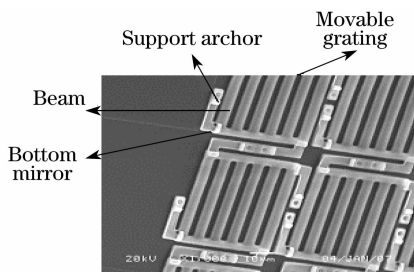


图 1 光栅光调制器阵列

Fig. 1 2D grating light modulator array

理想情况下,器件表面绝对平整。如果令器件上下反射面的光程差 h 为 $k\lambda/2$,此时相位差 $\phi_1 = 2k\pi$,衍射能量集中在 0 级,显示为亮态;如果令 h 为 $(2k+1)\lambda/4$,则相位差 $\phi_2 = (2k+1)\pi$,衍射能量集中在 ± 1 级,显示为暗态,通过光学信息处理即可实现高对比度的明暗调制效果。但在实际加工过程中,由于工艺条件或一些残余应力的存在,器件表面不可避免地存在一些变形。图 2 是利用国际上光学表面非接触检测公认的 VEECO 白光干涉仪对器件表面测试的结果,其中(a)图是垂直于光栅条方向(x 方向)的表面形貌图,(b)图是沿着光栅条方向(y 方向)表面形貌图,从图中可见,光栅面呈现一定的弯曲结构,特别是在垂直于光栅条的方向上,弯曲现象尤为明显。此时,不管器件被调制为亮态还是暗态,上下反射面之间的光程差不再是均匀值,(2)式修正为

$$t_s(x, y) = \left[\sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x+md}{a}\right) + \exp\left(\frac{j4\pi h^*(x, y)}{\lambda}\right) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x+md+d/2}{a}\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{L}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W}\right), \quad (3)$$

式中 h^* 为考虑到器件弯曲时的上下反射面之间的光程差。显然, h^* 在两种状态下不再满足单一的亮态条件或单一的暗态条件,这将为器件的调制效果带来一定的影响,而且弯曲程度不一样,对最终的调

制效果也可能不一样。接下来通过对器件表面的弯曲情况进行曲线拟合,并建立相关模型分析表面弯曲对器件调制性能的影响。

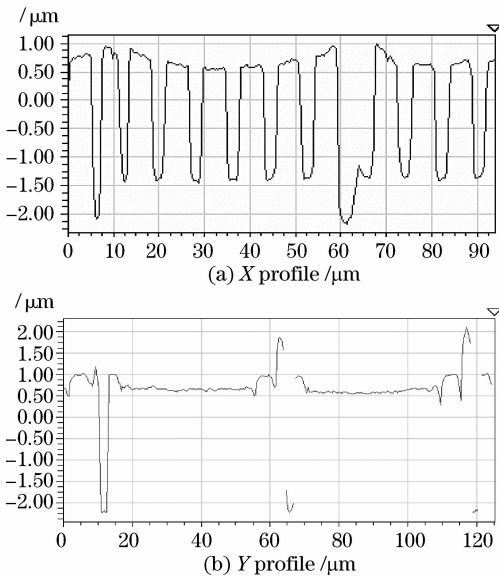


图2 光栅光调制器的表面形貌测试

Fig.2 Surface test of grating light modulator

3 仿真分析

为分析的简单起见,假设下层反射镜表面平整,上层的可动光栅面在两个相互垂直的方向上具有两个主曲率半径,这两个曲率半径在两个主坐标轴上。根据光栅方程和弯曲平板应力分析^[13~15],对图2的测得数据进行曲线拟合,得到单个器件的表面形貌结果如图3和(4)式所示。图3所示拟合曲线与测试曲线吻合较好。

$$h^*(x, y) = h - \delta \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \left(\cos \frac{2\pi x}{L} + \frac{1}{2} \cos \frac{2\pi y}{W} \right) \right]. \quad (4)$$

式中 h 表示理想情况下器件上下反射面在明态或暗态下的光程差。 δ 表示光栅面的弯曲程度,大小介于 0 和 $2h/3$ 之间,光栅面中心的弯曲程度最大为 $3\delta/2$ 。

将(4)式代入(3)式即为考虑光栅面弯曲时光栅光调制器的透过率函数。图4(a)为根据修正后的(3)式,利用 Matlab 软件建立的 2×2 光栅光调制器阵列模型,图中取光栅参数 $a=4 \mu\text{m}$, $d=8 \mu\text{m}$, L 和 W 为 $36 \mu\text{m}$, D_x 和 D_y 为 $48 \mu\text{m}$ 。其中器件 1 和 2 的初始相位差为 0,对应为亮态,3 和 4 的初始相位差为 π ,对应为暗态;并且器件 1 和 3 的 δ 为 $\lambda/8$,显示出一定的弯曲结构,2 和 4 的 δ 为 0,为理想平整的情况。经过傅里叶变换后,在频谱面上得到衍射光强的分布如图 4(b)所示,根据信息光学的知识,

衍射光强分布可以看作是光栅光调制器经傅里叶变换后得到的功率频谱,反映的是像素内部以及像素与像素之间的空间频率信息。如果对频谱进行一次反傅里叶变换又可以得到光栅的像,即可实现各单个像素衍射光的分离。由于在显示上,最终像面上需要的是每个像素的明暗情况,不需要内部的精细结构,因此在频谱面上滤除高级衍射光,只对 0 级衍射光进行反傅里叶变换,得到像面上的光强分布及像的特性如图 4(c)所示。由图可见,由于低通滤波滤去了像的精细结构,在每个像素位置只是出现简单的亮斑或暗斑,亮态时, δ 为 $\lambda/8$ 和 δ 为 0 这两种情况在像面上的亮度相差不大,即表面弯曲情况对亮态的影响不甚明显。而对应于暗态情况, δ 为 $\lambda/8$ 的像素比 δ 为 0 的像素明显亮很多,显然弯曲度对暗态的影响较大。

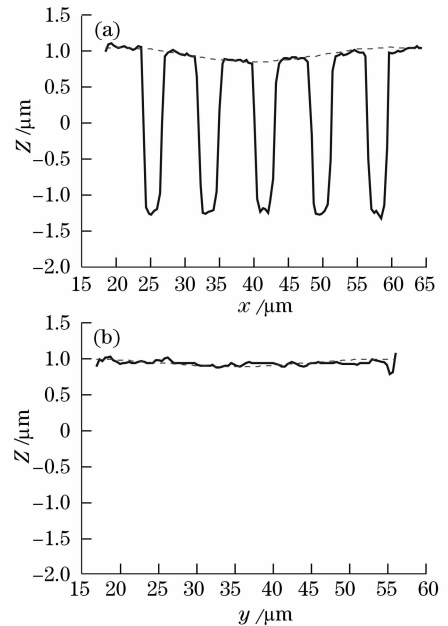


图3 拟合的光栅光调制器的表面弯曲度曲线。

(a) x 方向, (b) y 方向Fig.3 Simulated surface bending curve of grating light modulator. (a) x direction, (b) y direction

为了定量得到器件表面弯曲度对成像质量的影响,接下来主要从对比度这个参量为指标进行分析。根据对比度的定义式

$$V = \frac{I_{\text{bright}}}{I_{\text{dark}}} = \frac{T(f_x, f_y) T^*(f_x, f_y) \Big|_{h = \frac{\lambda}{2}}}{T(f_x, f_y) T^*(f_x, f_y) \Big|_{h = \frac{(2k+1)\lambda}{4}}}. \quad (5)$$

当上层光栅面弯曲程度不同时,利用 Matlab 计算,得到像面上的对比度情况如图 5 所示。平面二维坐标分别表示亮态和暗态情况下表示弯曲程度的 δ 的取值;纵坐标则表示不同弯曲程度所对应的对

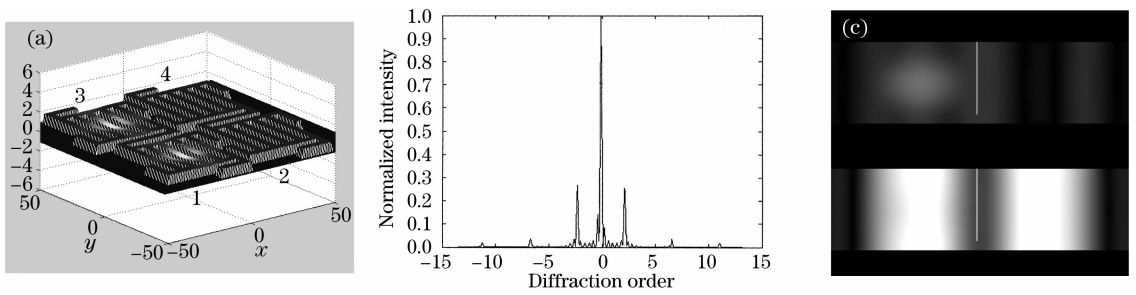


图 4 二维光栅光调制器光学仿真处理的仿真。(a)模型,(b)衍射光强分布,(c)0级衍射光的成像

Fig. 4 Simulation of light information processing for 2D grating light modulator.

(a) Model, (b) diffraction light distribution, (c) 0th order diffracted light image

比度。从图中可见,随着弯曲程度的增加,对比度迅速降低。并且由于相位中含有周期性信息,在对比度的下降过程中也呈现出周期性的变化。在亮态时,当光栅面稍有弯曲时,对比度迅速降低,且呈现出类似周期性变化,但是只要暗态时光栅面弯曲程度不大,对比度可以保持在 1000 以上;在暗态时,随着弯曲程度的增加,对比度以更快的速度下降,当 δ 大于 0.05λ 时,对比度降到 1000 以下。即从效果上看,暗态时光栅面的弯曲度对成像质量影响较大,这与图 4 的结果相吻合。如果要达到高于 1000 的对比度,必须保证调制器在暗态情况下上光栅面的弯曲程度不能超过 0.05λ ,光栅面中心的弯曲程度不能超过 0.1λ 。这就要求在器件设计和加工时,尽量将弯曲程度减小到以上范围以内,特别是要尽可能地提高暗态状态下的光栅表面平整度,从而提高显示质量。

波器,只让 0 级光通过,在像面上得到该列像素被调制为亮态和暗态时的投影光强分布,如图 6 所示,当电压为 0 时,该列像素显示为亮态,当电压接近为 20 V 时,该列像素显示为暗态。图 7 所示的正是电压与光强之间的反相同步变化关系,图中上面那条曲线表示施加在该列像素上的脉宽电压,下面那条曲线反映的是在电压作用下该列像素的光强变化,图中所示像素被调制后,光强变化明显,但从图 6 可见,当像素被调制为暗态时,还存在一定的光能量分布,被调制为亮态时,效果则较为理想,与之前仿真计算的结果基本一致,也即暗态时器件的弯曲度对成像质量影响较大,特别是对对比度带来明显的削弱作用,因此,在器件的设计与加工工艺上应尽量提高其在暗态时的平整度,根据弯曲发生的本质分析,器件光栅面的弯曲主要是由于薄膜中残余应力的存在所导致的表面不平,而在设计工艺上产生表面弯

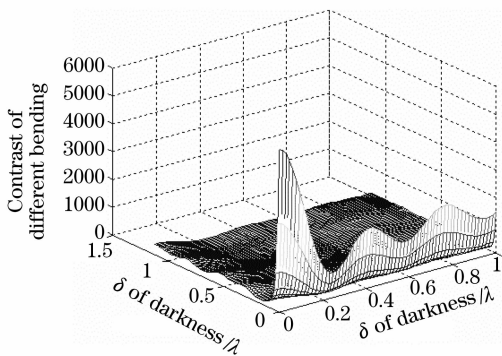


图 5 对比度与弯曲度的关系

Fig. 5 Relation between contrast and bending

4 实验与分析

为了验证实际加工的光栅光调制器的表面弯曲度对光学调制性能的影响,用一个 16×16 的光栅光调制器阵列进行光学投影实验,实验中通过脉宽电压调制其中一列像素,并在频谱面上放置一空间滤

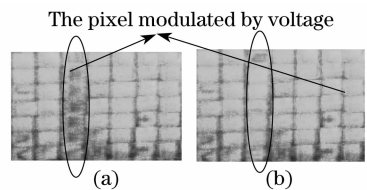


图 6 像面上像素的暗态(a)明态(b)和显示
Fig. 6 Darkness (a) and brightness (b) of pixel in image plane

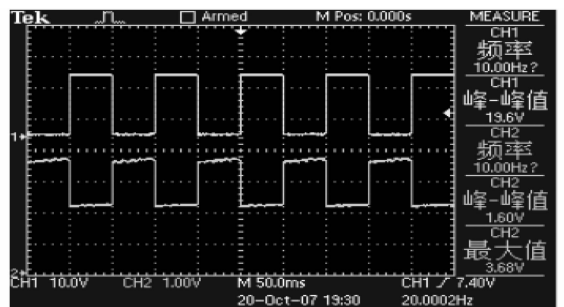


图 7 调制电压与光强的关系

Fig. 7 Relation between modulation voltage and light intensity

曲的一个重要方面是由于热应力所引起的双金属效应,因此在工艺上可以放弃使用 TiW 的双金属层结构,改用单层铝膜工艺;或者对上光栅面的中心采取一定的加厚措施,尽量减小表面的弯曲;同时考虑到器件在运动过程中也可能导致本来平整的平面变得不平,就此可以将暗态设计为器件的初始状态,也即器件上下表面的初始高度应满足 $(2k+1)\lambda/4$ 这一条件,尽可能避免由于下拉所导致器件的不平。

5 结 论

通过测试加工得到的光栅光调制器,根据其表面结构数据拟合出表面形貌曲线,建立了考虑表面不平时光栅光调制器模型。利用该模型仿真计算和实验得到以下结论:

(1) 器件被调制成亮态时,光栅面的弯曲现象对成像质量影响不大,只要暗态时光栅面平整,一般都可以达到 1000 以上的对比度。

(2) 器件被调制成暗态时,光栅面的弯曲现象对成像质量影响比较大,以对比度为参量,表面稍有弯曲就对导致对比度的急剧下降,如要保证大于 1000 的对比度,暗态时光栅面中心弯曲程度不能大于 0.1λ 。

(3) 在对加工工艺的改进上,可采用单层铝膜工艺或中间加厚法尽可能地减小光栅面的弯曲,亦可将暗态情况作为光栅光调制器的初始状态,尽可能地保证较大的对比度,达到满意的显示效果。

参 考 文 献

- 1 Kerwin Wang. *Micro-Optical Components for a MEMS Integrated Display*[D]. Doctoral dissertation of University of Washington, 2004. 4~8
- 2 Li Wei, Liu Deming, Yang Chunyong *et al.*. Design and implementation of a novel low cost intelligent optical wavelength cross converter connect[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(3): 351~355
李蔚,刘德明,杨春勇等.一种低成本智能全光波长交叉交换连接器的设计和实现[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 351~355
- 3 Sun Jiyong, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Transmitting Fabry-Pérot Light Modulator for Display Application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2240~2244
孙吉勇,黄尚廉,张洁等.用于显示的透射型法布里珀罗光调制器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2240~2244
- 4 Li Weil, Liang Jingqiu, Li Xiaoqi *et al.*. Design and simulation

- analysis of a micro optical switch[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1151~1154
李伟,梁静秋,李小奇等.一种微型光开关的设计与仿真分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1151~1154
- 5 Zhang Cuiyu, Huang Ziqiang. Characteristics analysis of binary optic liquid crystal blazed grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1231~1235
张翠玉,黄子强.二元光学液晶闪耀光栅的特性分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1231~1235
- 6 Jia Shuhai, Kong Weijun, Yang Jia. Design of optical acceleration sensor based on diffractive micro lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1494~1497
贾书海,孔维军,杨佳.基于衍射微透镜的光学加速度传感器设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1494~1497
- 7 J. B. Sampsel. An overview of the digital micromirror device (DMD) and its application to projection displays [J]. *SID International Symposium Digest of Technical Papers*, 1993, **24**: 1012~1015
- 8 D. M. Bloom. The grating light valve: revolutionizing display technology[C]. *Proc. SPIE, Projection Displays III*, 1997, **3013**: 165~171
- 9 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
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
- 10 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量的优化分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1121~1126
- 11 Sun Jiyong, Huang Shanglian, Zhang Jie *et al.*. Optical analysis and experiments of two-dimensional grating light modulator array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1136~1140
孙吉勇,黄尚廉,张洁等.二维光栅光调制器阵列的光学分析与实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1136~1140
- 12 Shi Lingna, Huang Shanglian, Sun Jiyong *et al.*. Optical performance analysis and experiment of grating light modulator with LED light source[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2225~2231
史玲娜,黄尚廉,孙吉勇等.LED照明的光栅光调制器光学特性分析与实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2225~2231
- 13 M. Adrian Michalick, Darren E. Sene, Victor M. Bright. Advanced modeling of micromirror devices [J]. *International Conference on Integrated Micor/Nanotechnology for Space Applications*, 1995, 153: 197~212
- 14 Zhou Mingbao, Lin Dajian, Guo Lvrong *et al.*. Expanding depth measurement range by white-light phase-shifting interferometry. [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(8): 1065~1071
周明宝,林大键,郭履容等.用白光相移干涉增大表面形貌可测范围的研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1065~1071
- 15 Stephen D. Senturia. *Microsystem Design* [M], Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004
Stephen D. Senturia. *微系统设计*[M]. 北京:电子工业出版社, 2004