

文章编号: 0253-2239(2010)11-3128-05

# 一种新型 SOG 周期可调光栅的制作及其衍射性能测试

燕斌 苑伟政 虞益挺 乔大勇 孙瑞康 李太平

(西北工业大学微/纳米系统实验室, 陕西 西安 710072)

**摘要** 研制了一种基于微光机电系统(MOEMS)技术的新型微型可编程光栅——周期可调光栅。该光栅采用玻璃体上硅(SOG)加工工艺,静电梳齿驱动,具有操作简单、连续可调和宽调制等特点。该光栅在静电驱动力的作用下,周期的变化引起特定级次下单色光衍射角的变化及复色光光谱的偏移。针对该光栅的衍射特性,设计及搭建两套光学系统,根据光栅结构设计参数的理论计算与测量结果基本一致,充分表明该光栅能对光具有良好的调制作用。为该器件在微型光谱仪和光开关的应用提供了技术参考。

**关键词** 微光机电系统(MOEMS);微型可编程光栅;周期可调光栅;玻璃体上硅(SOG);衍射特性

**中图分类号** TN303 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103011.3128

## Fabrication and Experimental Investigation of Diffraction Characteristics for a Pitch-Tunable Grating Based on SOG Process

Yan Bin Yuan Weizheng Yu Yiting Qiao Dayong Sun Ruikang Li Taiping

(Microelectromechanical systems / Nanoelectromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

**Abstract** Based on the micro-opto-electro-mechanical systems (MOEMS) technology, a new micro programmable grating with tunable pitch is designed and fabricated by using silicon-on-glass (SOG) processing. The pitch-tunable grating has prominent advantages over the conventional optical devices such as simple operation, continuous adjusting, and wide modulation. The change of the grating pitch results in the change of monochromatic diffraction angle and chromatic wavelength. Then two experimental setups for practically measuring the change of monochromatic diffraction angle and chromatic wavelength are designed and established, respectively. The characteristics of the grating according to the designed structural dimensions agree very well with the experimental results, which proves that the grating has good modulation performances. This work lays a good foundation for the future research in micro spectrometers and optical communication and provides valuable technical references.

**Key words** micro-opto-electro-mechanical system (MOEMS); micro programmable grating; pitch-tunable grating; silicon-on-glass (SOG); diffraction characteristics

## 1 引言

衍射光栅作为光学仪器中的重要分光核心元件,在物质分析、探测、工业自动化控制和天文研究等领域具有广泛的应用。传统技术制作的光栅(机械刻划光栅、复制光栅和全息光栅)其光栅常数、闪

耀角等结构参数都无法随应用的实时要求而改变,即实现工作过程中的动态控制,因此其应用受到很大程度的限制。

随着微光机电系统(MOEMS)技术的发展,与常规系统相比,MOEMS使光学元件的尺寸大幅度

收稿日期: 2009-12-31; 收到修改稿日期: 2010-04-08

基金项目: 西北工业大学博士论文创新基金(CX200611)资助课题。

作者简介: 燕斌(1979—),男,博士研究生,主要从事微光机电系统以及精密仪器等方面的研究。

E-mail: ybnwpu@163.com

导师简介: 苑伟政(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事微/纳机电系统、精密制造技术等方面的研究。

E-mail: yanw2@nwpu.edu.cn

减小,并实现了光学元件由静到动的飞跃,为研究开发新型功能光器件开辟了一条道路<sup>[1~4]</sup>。MOEMS 微型可编程光栅是在 MOEMS 以及光栅技术的基础上诞生的一个新的研究领域。其“可编程”的含义是指:通过驱动电路的编程控制,使光栅结构单元产生预期的变形,从而实现对光栅周期和闪耀角等结构参数的调节,引起衍射光的光能分布发生变化,得到预期的衍射和干涉能量分布特性<sup>[5~6]</sup>。

近年来,美国康奈尔大学<sup>[7]</sup>、瑞士 CESM<sup>[8]</sup> 等均报道过基于绝缘体上硅(SOI)技术的周期可调式微型可编程光栅样件,采用静电驱动的方式,周期变化率均小于 3%。本文研制了一种新型的周期可调微型可编程光栅,该光栅采用玻璃体上硅(SOG)工艺,其周期变化率具有大的连续可调范围。为了监测不同电压下,光栅不同周期下的光学性能的变化情况,分别采用两种不同的光学检测方法,对周期可调式光栅的衍射特性进行测试。

## 2 工作原理

周期可调式光栅及其驱动结构简图如图 1 所示,周期可调式光栅驱动采用静电梳齿结构,可动梳齿连接光栅结构,固定梳齿连接于固定锚点。周期连续可调光栅工作原理示意图如图 2 所示,对于不

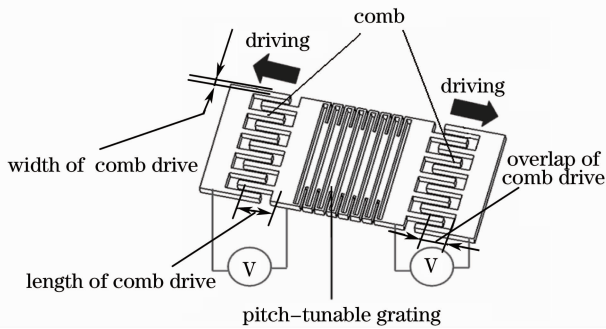


图 1 周期可调光栅结构简图

Fig. 1 Structure diagram of pitch-tunable grating

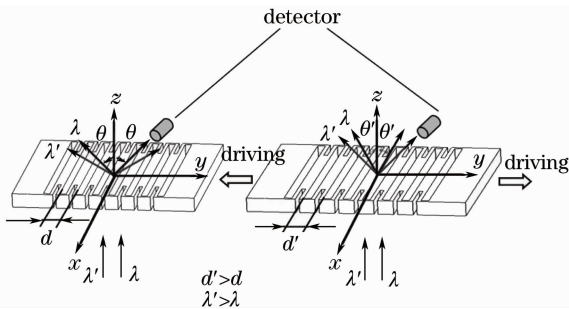


图 2 周期可调光栅工作原理示意图

Fig. 2 Working principle of pitch-tunable grating

同波长的光  $\lambda, \lambda' (\lambda' > \lambda)$ , 垂直入射周期为  $d$  的光栅,当可动梳齿与固定梳齿加载一电压时,两者之间产生静电驱动力驱动可动梳齿向固定梳齿运动,从而带动光栅周期参数发生变化;此时,光栅周期为  $d' (d' > d)$ 。

若光栅工作在透射模式和 +1 级的情形下,根据光栅方程<sup>[9,10]</sup>描述有

$$d \sin \theta = m \lambda = \lambda. \quad (1)$$

若保持单色光垂直入射,即光的波长不发生改变,则光栅周期变化后增加为  $d'$ ,衍射角  $\theta'$ ,则满足

$$d' \sin \theta' = m \lambda = \lambda. \quad (2)$$

由于周期  $d' > d$ ,故光栅周期改变后,则单色光的衍射角发生变化:

$$\Delta \theta = \theta' - \theta < 0. \quad (3)$$

若保持衍射角  $\theta$  不变,即探测器的位置发生不变,则光栅周期变化后增加为  $d'$ ,探测器所探测到的波长  $\lambda'$ ,则满足

$$d' \sin \theta = m \lambda' = \lambda'. \quad (4)$$

由于周期  $d' > d$ ,故光栅周期改变后,则探测器所接收到波长变化

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda > 0. \quad (5)$$

针对光栅周期变化引起的单色光的衍射角  $\Delta \theta$  和固定衍射角的波长变化  $\Delta \lambda$  进行测量,由于电压不同对应不同的光栅周期,故实际测量不同的电压下光栅衍射角和波长的变化。

## 3 设计及加工

体硅工艺与表面工艺相比,具有应力小、表面质量好等优点;相比较于湿法腐蚀工艺,具有结构尺寸精确可控、刻蚀与晶向无关、可制备高深宽比的微梁或沟槽、污染小等优点;且整个工艺流程简单<sup>[11,12]</sup>。因此,本文采用 SOG 加工工艺制备光栅。周期可调光栅基于 SOG 工艺流程如下<sup>[13]</sup>(示意图如图 3 所示):

(a)在玻璃基底上淀积一层 Au 膜,并图形化,用作引线 and 焊盘;

(b)在 p 型掺杂硅的一侧刻蚀出一定高度的锚点结构;

(c)将由步骤(a)和步骤(b)得到的玻璃基底与硅片通过锚点键合在一起,并对硅片的上表面进行机械抛光处理,得到一定厚度的器件层;

(d)对硅器件层进行干法深硅刻蚀,得到光栅的结构。

SOG 周期可调式微型可编程光栅的器件参数如表 1 所示。制作得到的周期可调光栅,如图 4 所示。

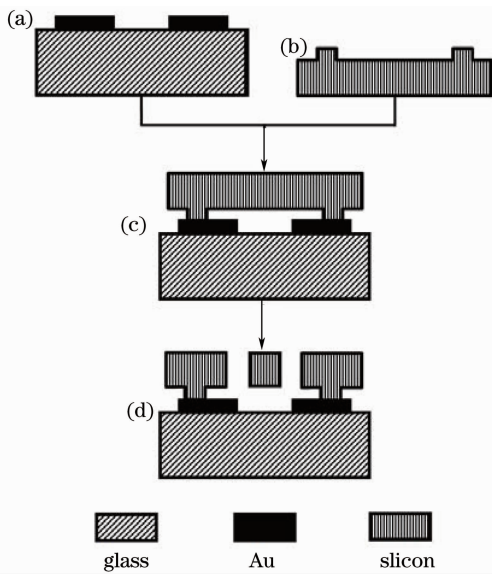
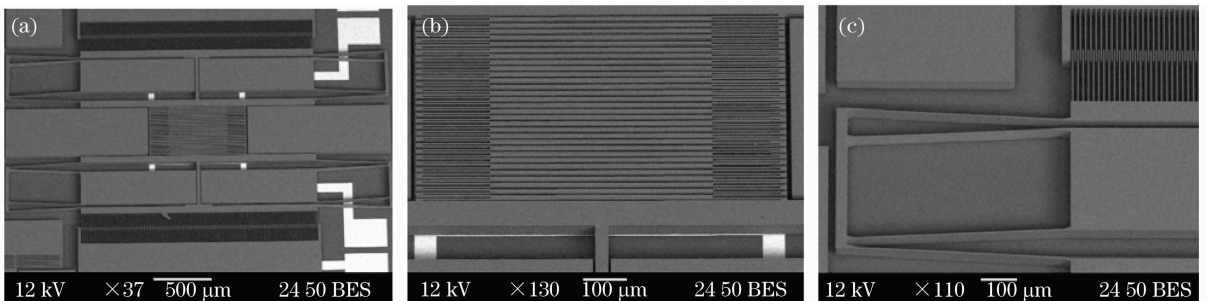


图3 周期可调光栅基于SOG工艺流程图

Fig. 3 SOG processing for fabricating the pitch-tunable grating

表1 设计的SOG周期可调式微型可编程光栅的器件参数  
Table 1 Main structural and processing parameters for the pitch-tunable grating

Parameters	Value / $\mu\text{m}$
Thickness of grating structure	50
Thickness of anchor	50
Length of beam	500
Width of beam	10
Gap of beam	5
Length of comb drive	150
Width of comb drive	4
Gap of comb drive	3
Overlap of comb drive	30

图4 制作的周期可调光栅扫描电镜(SEM)照片。(a)整体结构;(b)光栅微梁局部放大图;(c)光栅支撑梁局部放大图  
Fig. 4 SEM pictures for the fabricated pitch-tunable grating. (a) whole device; (b) zoomed view of the grating beams; (c) zoomed view of the supporting beams

## 4 测量原理及方法

### 4.1 衍射角变化的测量

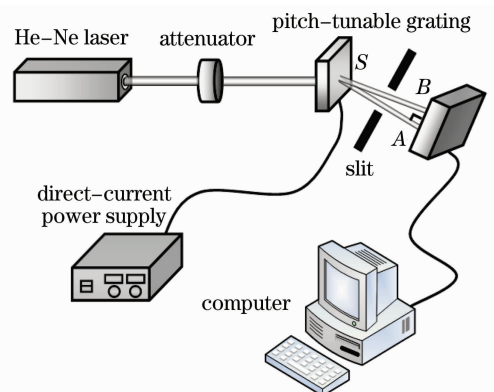
衍射角变化的测量原理图如图5所示,测量原理采用激光三角法<sup>[14]</sup>。该方法利用一束单色光照到所制备的周期可调式光栅,利用衍射后的某级次的光SA垂直照射到CCD相机上,形成激光光斑。当对周期可调式光栅施加电压时,由于周期的改变使衍射光束发生偏移移到SB。若A点在CCD相机的位置为a,B点在CCD相机的位置为b,衍射光SA的距离为D,SA偏移的角度为 $\alpha$ ,则得

$$\tan \alpha = (a - b)/D, \quad (6)$$

即

$$\alpha = \arctan[(a - b)/D]. \quad (7)$$

实验中,光源采用波长为632.8 nm的He-Ne激光,可调衰减器用来调节CCD相机接收到的光斑强

图5 衍射角变化的测量系统实验装置图  
Fig. 5 Experimental setup for measuring the change of diffraction angle

弱,可调狭缝用来选择需要的光栅衍射级次,直流可调电源用于驱动光栅改变周期,计算机用来记录CCD

相机记录的激光光斑图像。实验选用的是 MVC1000 系列 CCD 相机,其有效像素为  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,像素尺寸为  $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$ 。光斑位置的变化采用数字图像处理的方法,整个数字图像处理方法如图 6 所示<sup>[15~18]</sup>。基于 CCD 相机获取的激光光斑图像较规则,采用形心法获取光斑图像中心<sup>[19]</sup>。

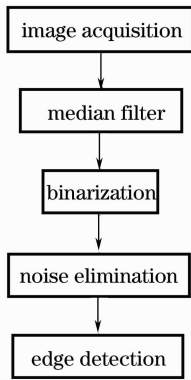


图 6 光斑位置变化的数字图像处理方法

Fig. 6 Digital image processing for the change of spot position

### 4.2 波长变化的测量

波长变化测量装置如图 7 所示,该方法利用复色的光纤光源,经过透镜 A1 准直和孔径光阑后照射周期可调光栅,衍射后形成一条彩色的光谱谱带,经过很细的狭缝和光纤探头,则单色波长的光线进入光谱仪,可测得波长。当对周期可调光栅施加电压时,改变周期可调光栅的周期,光谱仪光纤探头位置保持不变,则进入光谱仪的波长发生改变。

图 8 给出了当给光栅施加 60 V 电压时,对于光栅 +2 级,光谱仪所测波长的变化。实验中,光纤光源采用北京大恒光电公司的直流调压光纤光源(GCI-0601),工作波长范围为  $340 \sim 850 \text{ nm}$ ,光谱仪采用美国海洋光学公司微型光纤光谱仪(USB4000-VIS-

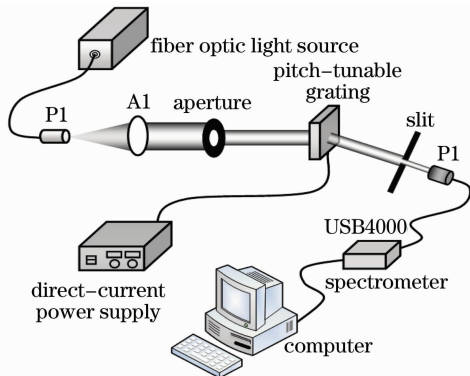


图 7 波长变化的测量系统实验装置图

Fig. 7 Experimental setup for measuring the change of wavelength

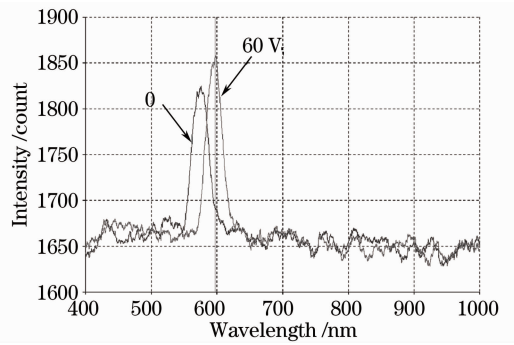


图 8 +2 级不同电压下波长变化的实验结果

Fig. 8 Measured changes of wavelength at different voltages for the +2nd order

NIR),光谱分辨率可达到约  $1.5 \text{ nm}$ (半峰全宽)。

## 5 测量结果及分析

根据测量实验方案所得图片处理并计算相关结果,用 Matlab 绘制成曲线如图 9~11 所示。

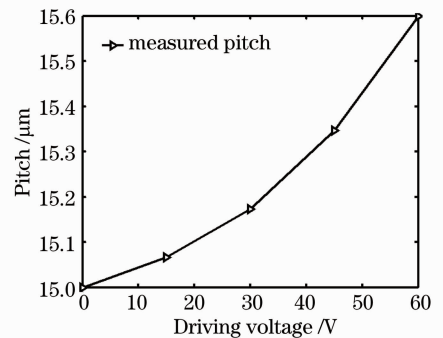


图 9 实际测量周期随电压变化曲线

Fig. 9 Measured pitch versus voltage

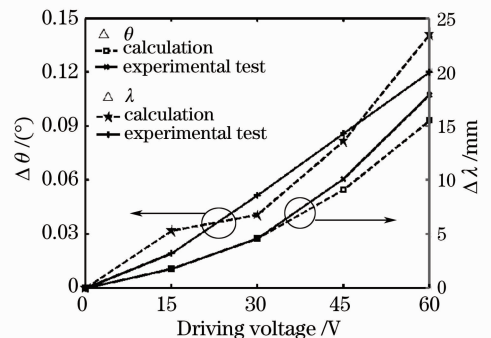


图 10 +1 级衍射角测量结果图

Fig. 10 Measurement results for the +1st order diffraction angle

图 9 为在显微镜下,随驱动电压的变化,光栅的周期发生变化的测量曲线图。由此,可以得出所制备的周期可调光栅,具有  $4.62\%$  的周期可调范围;相对国外报道的周期可调式光栅,具有较宽的可调范围。图 10,11 分别为 +1、+2 级衍射角变化和

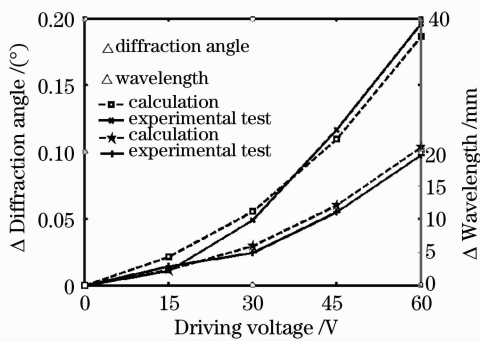


图 11 +2 级衍射角测量结果图

Fig. 11 Measurement results for the +2nd order diffraction angle

波长变化的实际测量结果与理论计算的曲线图。由此,可以得出测量结果与理论计算基本一致,衍射角变化的测量误差主要是由于图像处理 and 光栅周期测量误差引起,波长变化的测量误差是主要是由于光栅周期比较大,分辨率较低,光谱本身没有完全分开及光谱仪的测量分辨率导致所测的波长的误差。

## 6 结 论

介绍了一种基于 MOEMS 技术的新型微型可编程光栅——周期可调光栅的工作原理、设计及其加工工艺,设计及搭建两套光学系统,对其衍射特性进行测试。两种测量方法的测量结果充分验证:周期可调光栅具有 4.62% 宽的可调范围,且在不同电压下,光栅周期的变化引起衍射角的变化和固定衍射角波长的变化与理论值基本一致。因此,周期可调光栅能对光进行很好地调制。本文的测试方法及结果为周期可调光栅的深入研究奠定了良好基础,同时对周期可调光栅应用于微型光谱仪、光通信等领域提供了有价值的技术参考。

## 参 考 文 献

- Hu Qiaoyan, Yuan Jing, Li Jing *et al.*.  $4 \times 4$  crossbar micro-electro-mechanical system optical matrix switches[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 937~941  
胡巧燕,袁菁,李静等.  $4 \times 4$  纵横交换微机电系统光开关阵列[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 937~941
- Yuan Ye, Zou Yongzhuo, Bao Junfeng *et al.*. A novel variable optical attenuator based on micro-electromechanical system (MEMS) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 364~368  
袁野,邹勇卓,鲍俊峰等. 一种新型微机电系统可调光衰减器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 364~368
- 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
- Zhang Jie, Huang Shanglian, Zhang Zhihai *et al.*. Experiments and structural optimization of micro-electro-mechanical system-

- based grating moving light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1565~1569  
张洁,黄尚廉,张智海等. 基于微机电系统光栅平动式光调制器实验和优化设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1565~1569
- Yu Yiting, Yuan Weizheng. Review of MEMS-based programmable gratings: Part II [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2008, **29**(6): 1339~1344  
虞益挺,苑伟政. MEMS 微型可编程光栅的研究现状(下)[J]. *仪器仪表学报*, 2008, **29**(6): 1339~1344
- Yu Yiting, Yuan Weizheng, Wang Lanlan *et al.*. Theoretical analysis and experimental measurement on the maximum blazing angle for microprogrammable gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2220~2224  
虞益挺,苑伟政,王兰兰等. 微型可编程光栅最大闪耀角的理论分析与实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2220~2224
- Dong Yan, Amit Lal. Design and characterization of slit variable microgratings[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2006, **6**(2): 458~464
- R. Lockhart, M. Tormen, P. Niedermann *et al.*. High-efficiency MEMS tuneable gratings for external cavity lasers and microspectrometers[J]. *IEEE/LEOS Internat. Conf. on Optical MEMS and Nanophotonics*, 2008. 33~34
- Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics*[M]. Tianjing: China Machine Press, 1999. 267~68  
郁道银,谈恒英. *工程光学*[M]. 天津:机械工业出版社, 1999. 267~268
- Zhang Zhengxi. *Optics*[M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1994. 211~216  
张振杰. *光学*[M]. 西安:西北大学出版社, 1994. 211~216
- Cornel Marxer, Christian Thio, Marc-Alexia Gretillat *et al.*. Vertical mirrors fabricated by deep reactive ion etching for fiber-optic switching applications [J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 1997, **6**(3): 277~285
- Kei Ishihara, Chifan Yung *et al.*. An inertial sensor technology using DRIE and wafer bonding with interconnecting capability [J]. *J. Microelectromechanical Systems*, 1999, **8**(4): 403~408
- Yiting Yu, Weizheng Yuan, Bin Yan *et al.*. Development of a micromechanical grating optical modulator for optical network[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(24): 5681~5686
- Zhou Hongfeng, Wang Dongyun, Huang Tiru *et al.*. The study of measure model and optical path design of small angle measured by laser triangulation[J]. *J. Yunnan Nationalities University*, 2008, **17**(3): 277~279  
周红锋,王东云,黄锦儒等. 激光三角法测量小角度的测量模型和光路设计研究[J]. *云南民族大学学报:自然科学版*, 2008, **17**(3): 277~279
- Jia Yonghong. *Digital Image Processing*[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003. 25~121  
贾永红. *数字图像处理*[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003. 25~121
- Zhang Yujin. *Image Processing and Image Analysis*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 133~156  
章毓晋. *图像处理和图像分析*[M]. 北京:清华大学出版社, 1999. 133~156
- Jin Jinyao, Zhang Zhijiang. Calculation of feature points imaging center for vision coordinate measurement [J]. *Metrology Technol.*, 2003, (6): 3~5  
金锦耀,张之江. 视觉坐标测量中特征点成像中心的计算[J]. *计量技术*, 2003, (6): 3~5
- Ji Lijiang. *Research on the Measuring Instrument of Gun Barrel Axis Straightness* [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003. 40~60  
季立江. *炮管轴线直线度检测仪研究*[D]. 成都:四川大学, 2003. 40~60
- Li Xiaolei. *A Study of Guide-Ways Linearity Measurement Based on Image*[D]. Xi'an, Xi'an University of Technology, 2007. 33~34  
李晓蕾. *图像法实现导轨直线度测量系统的研究*[D]. 西安:西安理工大学, 2007. 33~34