

# 红外光谱仪多级微反射镜模拟分析及制作研究

郑 莹<sup>1,2</sup> 梁中翥<sup>1</sup> 梁静秋<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 随着环境科学、气象监测和空间探测等前沿基础研究领域的发展, 可便携、实时监测的光谱仪器的需求变得更加迫切。以多级微反射镜为关键器件的空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪体积小、无可动部件, 可实现实时检测与在线监测。模拟分析了多级微反射镜的台阶高度及表面粗糙度对复原光谱的影响, 得到多级微反射镜的台阶高度允许的最大误差为  $\pm 0.18 \mu\text{m}$ , 反射面表面粗糙度的最大容限为 150 nm 和 200 nm。根据实验研究及对比分析, 选用多次光刻-电镀方法制作了多级微反射镜。测试表明, 以此方法制作的多级微反射镜表面粗糙度均方根 (RMS) 值为 90.23 nm, 台阶高度误差值为  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ , 基本满足系统的设计要求。

**关键词** 光学设计与制造; 傅里叶光学; 多级微反射镜; 空间调制; 阶梯高度; 表面粗糙度

中图分类号 O433.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1222005

## Simulation and Fabrication of Multi-Micromirrors Used in Infrared Spectrometer

Zheng Ying<sup>1,2</sup> Liang Zhongzhu<sup>1</sup> Liang Jingqiu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** With the modernized development of environmental science, weather observation and space detection and so on, it is an urgent requirement to carry out the research of portable and real-time supervised Fourier transform spectroscope in the leading basic research. A new micro-spaced modulated Fourier transform infrared spectroscope is proposed, without moving parts in this configuration. Thereinto, two multi-micromirrors are the key components in the interferometric system. The effect on the recovery spectra of the height of steps and the roughness of reflective surfaces in multi-micromirrors is simulated, and the height error of steps that can be tolerated by the system is  $\pm 0.18 \mu\text{m}$ , and the biggest roughness is settled at 150 and 200 nm. The multi-micromirror is fabricated by lithography-electroplating. The test result of the roughness of the reflectives surfaces of the multi-micro mirror (RMS) is 90.23 nm, and the height error of steps is  $\pm 0.1 \mu\text{m}$ , which meet the requirement of the design.

**Key words** optical design and fabrication; Fourier optics; micro-multimirrors; space-modulation; step height; surface roughness

**OCIS codes** 220.4000; 300.6340; 300.6190; 300.6300

## 1 引 言

傅里叶变换光谱仪具有高精度、多通道、高通量、宽光谱范围以及结构紧凑等优势, 是固体、液体及气体样品光谱的极为有效的测量和分析工具。随

着环境科学、气象监测、空间探测等前沿基础研究领域的现代化发展, 高精度、高分辨率、小型化的傅里叶变换光谱仪较之体积、重量庞大的大型傅里叶变换光谱仪在应用上更为便利, 是前沿科学研究的重

收稿日期: 2011-04-22; 收到修改稿日期: 2011-07-26

基金项目: 国家 863 计划(2009AA04Z315)和国家自然科学基金(60977062, 61027010)资助课题。

作者简介: 郑 莹(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事微小型静态干涉系统器件设计、制作及检测等方面的研究。

E-mail: optics\_zhy@yahoo.cn

导师简介: 梁静秋(1962—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事微光机电系统与光通信等方面的研究。

E-mail: liangjq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

要仪器设备<sup>[1~5]</sup>。

傅里叶变换光谱仪一般分为时间调制型<sup>[6,7]</sup>和空间调制型<sup>[8~12]</sup>。空间调制傅里叶变换光谱仪由于没有动镜驱动系统,结构紧凑,因而更适用于实时检测与在线监测。基于多级微反射镜的微型空间调制红外傅里叶变换光谱仪利用两个固定的多级微反射镜取代了传统的时间调制傅里叶变换光谱仪的动镜与定镜<sup>[13~16]</sup>;而工作于中长波红外波段(3~5 μm),可以探测气体分子和液体分子转动光谱和振动光谱,对识别分子具有十分重要的意义。

作为该光谱仪的核心部件,多级微反射镜在整个结构的实现中起着关键的作用。本文对多级微反射镜的台阶高度及反射面表面粗糙度的最大容限值进行了模拟分析,从而为多级微反射镜的制作研究提供了标准和依据。并采用多次光刻-电镀法制作了第一多级微反射镜,基本达到设计要求。

## 2 工作原理

图1是基于多级微反射镜的空间调制傅里叶变换红外光谱仪的工作原理示意图。由光源发出的光

经过准直透镜后变为平行光束,再经分束器,分为两束光,分别投射至正交摆放的两个多级微反射镜的反射面上。然后,两束反射光再次经过分束器。根据奈奎斯特采样定理,即采样间隔 $\Delta$ 必须小于最小工作波长的二分之一,对于3~5 μm光谱范围,也就是要 $\Delta < 1.5 \mu\text{m}$ ,即当第一多级微反射镜的台阶高度(阶梯常数 $H$ )小于 $0.75 \mu\text{m}$ 时,通过离散采样可以重构原始的光谱信息。结合光谱分辨率要求及衍射效应的分析<sup>[17]</sup>,两个多级微反射镜具有相同的子反射面长度和宽度,但有不同的台阶高度。分束器上一点分出的两束光由于多级微反射镜结构引起光的相位变化不同,再次相遇干涉后携带有相应的相位信息。不同空间点的干涉光的级次不同,并按一定规律排列,从而可以实现不同级次的干涉光的空间分割。形成的干涉图被探测器接收,经过傅里叶变换得到复原光谱。图2为系统中多级微反射镜的结构示意图,台阶长度为 $L$ ,宽度为 $W$ ,高度为 $H$ ,多级微反射镜的阶梯数为 $m$ 。

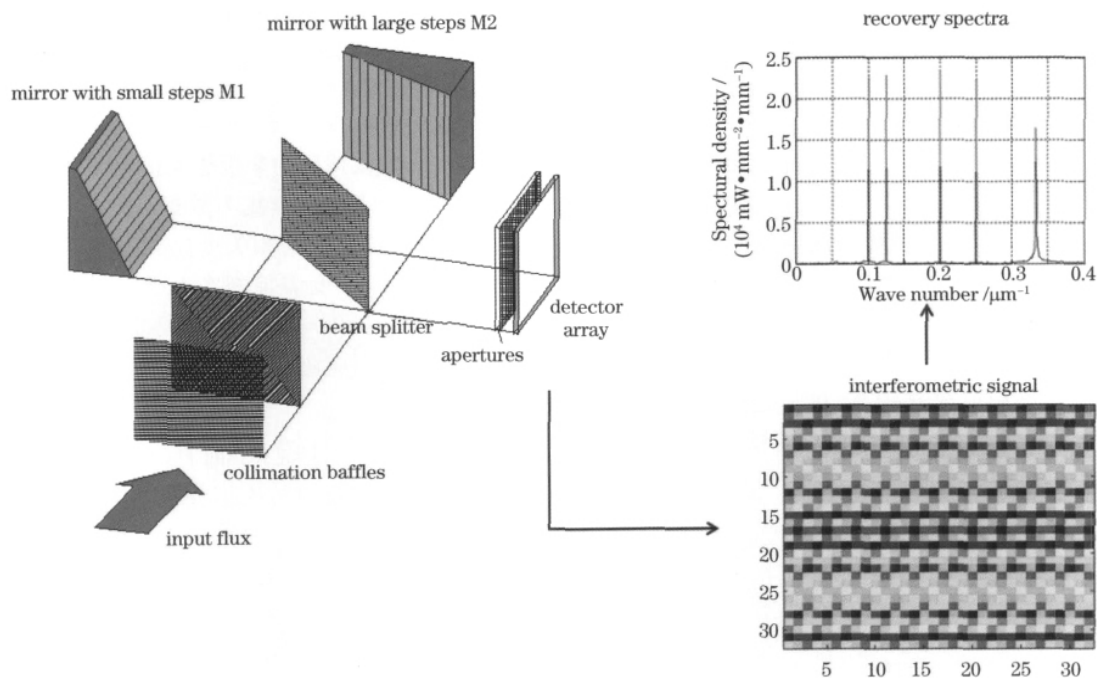


图1 空间调制傅里叶变换红外光谱仪原理图

Fig.1 Schematic diagram of space-modulated Fourier transform infrared spectrometer

## 3 红外波段多级微反射镜模拟分析

### 3.1 多级微反射镜表面粗糙度模拟分析

粗糙度的存在使系统中的多级微反射镜存在漫

反射,所产生的杂散光使干涉图受到影响,复原光谱后存在一定的噪声。采用专业光学模拟软件模拟分析了多级微反射镜表面粗糙度对复原光谱的影响。

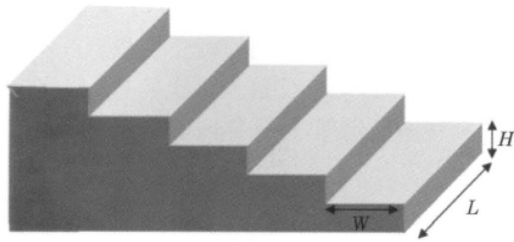


图 2 多级微反射镜结构示意图

Fig. 2 Sketch of multi-micromirror

在模拟分析过程中, 设定入射波长为 3, 4, 5, 8 和 10  $\mu\text{m}$ , 对应的波数分别为 0. 333, 0. 250, 0. 200, 0. 125 和 0. 100  $\mu\text{m}^{-1}$ ; 两个多级微反射镜的表面粗

糙度值在 0~350 nm 之间。取 50 组不同的粗糙度数值, 将复原后的光谱图与理想情况下光谱图进行比较。结果表明, 复原光谱的失真度随两个多级微反射镜表面粗糙度的增加而增大。图 3(a) 为理想状态下的复原光谱图。图 3(b) 给出了两个多级微反射镜的粗糙度分别为 100 nm 和 50 nm 时复原光谱图, 此时, 多级微反射镜的粗糙度对复原后的光谱影响可以忽略。图 3(c) 为两个多级微反射镜的粗糙度分别设为 200 nm 和 350 nm 时的复原光谱图, 光谱失真严重, 弱信号被噪声淹没。从表面粗糙度对复原光谱的影响考虑, 多级微反射镜的表面粗糙度的容限值分别为 150 nm 和 200 nm。

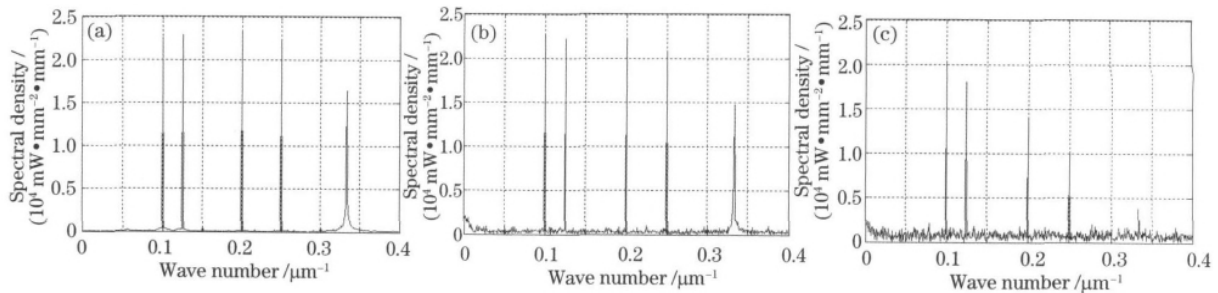


图 3 多级微反射镜反射面不同粗糙度时复原光谱图。(a) 0 nm, 0 nm; (b) 100 nm, 50 nm; (c) 200 nm, 350 nm

Fig. 3 Recovered spectra of the reflective surface of multi-micro-mirrors with different roughness (RMS). (a) 0 nm, 0 nm; (b) 100 nm, 50 nm; (c) 200 nm, 350 nm

### 3.2 台阶高度误差容限计算

在多级微反射镜的工艺制作中产生的台阶高度误差会带来采样点的非均匀性, 进而造成还原光谱失真。在分析中, 两个多级微反射镜的理想台阶高度分别为  $H_1$  和  $H_2$ , 现设定多级微反射镜的实际台阶高度分别是以  $H_1$  和  $H_2$  为中心, 标准差为  $\sigma$  的正态分布。以 730 K 的理想黑体为光源, 由于短波长对台阶高度容限值要求较高, 在此选择辐射波段范围为 0. 2~0. 4  $\mu\text{m}^{-1}$ 。设被测样品有三个吸收峰。

采用快速傅里叶变换 (FFT) 算法还原光谱, 并绘出理想光谱和加误差后的非理想光谱相关度与  $\sigma$  之间的曲线, 如图 4 所示, 虚线为数据点连线, 实线为拟合线, 横轴为  $\sigma$ , 纵轴为相关度 (%)。考虑系统误差分配及涨落, 相关度需控制在 95% 以上, 确定可接受的  $\sigma$  应小于 0. 06  $\mu\text{m}$ 。根据  $3\sigma$  准则, 最大与最小台阶高度误差不应超过 0. 18  $\mu\text{m}$ 。

### 4 多级微反射镜的制作及测试研究

在对多级微反射镜模拟分析的基础上, 结合微机电系统 (MEMS) 工艺的精确定位优势, 采用多次光刻-电镀的方法对多级微反射镜的制作进行了实验研究, 制作了第一多级微反射镜。图 5 是以 4 个反射面的台阶结构为例的制作工艺流程示意图。首先, 利用光刻技术在基底特定区域上得到形成光刻胶掩膜图形, 如图 5(a) 所示。然后, 再利用电镀工艺沉积一层厚度为  $mH_1/2$  的薄膜,  $m$  为多级微反射镜的反射面数,  $H_1$  为第一多级微反射镜的台阶高度, 如图 5(b) 所示。然后去除光刻胶, 即得到如图 5(c) 所示的 2 个反射面的台阶结构。再用第二块光刻版重复以上工艺步骤, 即可得到 4 个反射面

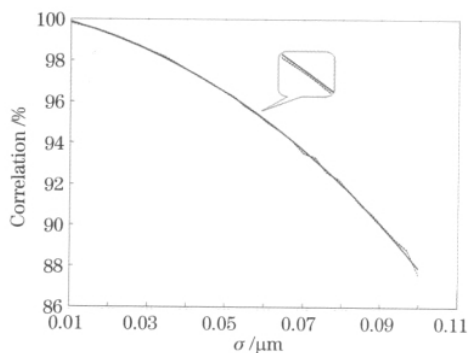


图 4 标准差与相关度关系曲线

Fig. 4 Correlation as a function of standard deviation

的台阶结构,如图 5(d)~(f)所示。在该结构上蒸镀或溅射红外反射膜及保护膜,即可得到完整的多

级微反射镜。根据设计及实验研究发现,该方法选用同种膜层材料或不同的膜层材料均可。

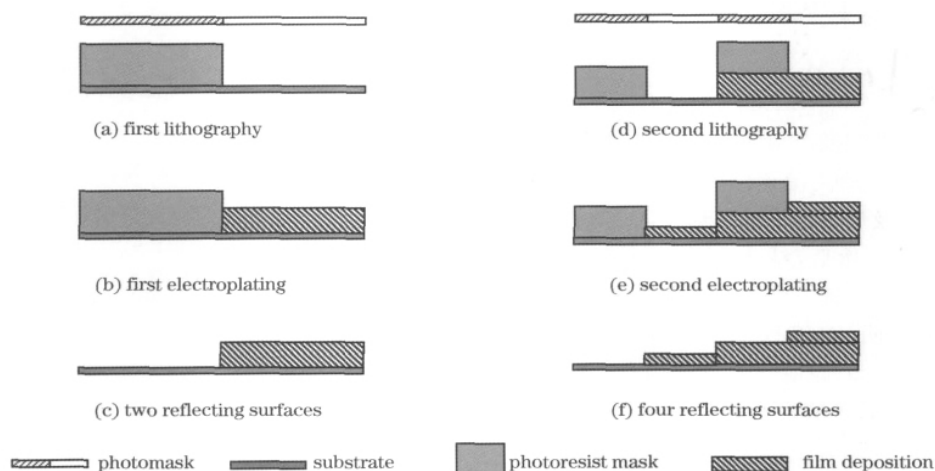


图 5 多次光刻-电镀方法制作多级微反射镜流程图

Fig. 5 Manufacturing diagram of multi-micromirrors by lithography-electroplating

图 6 为镀有反射膜的第一多级微反射镜的实物图。采用 KLA-Tencor P-16+ 台阶仪对多级微反射镜的台阶高度及反射面表面粗糙度进行测量。图 7(a)是第一多级微反射镜的台阶高度测试图,方框区域是 3 个台阶的放大图。测量中,台阶仪探针扫描距离完全覆盖了多级微反射镜的最低与最高台阶的水平距离,扫描速度为  $100 \mu\text{m/s}$ ,扫描频率为  $200 \text{ Hz}$ ,测试结果表明,台阶高度在  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  范围内。图 7(b)是第一多级微反射镜反射面粗糙度测试图,台阶仪探针扫描距离为  $2500 \mu\text{m}$ ,扫描速度为



图 6 镀有反射膜的多级微反射镜实物图

Fig. 6 Multi-micromirrors with reflect coating

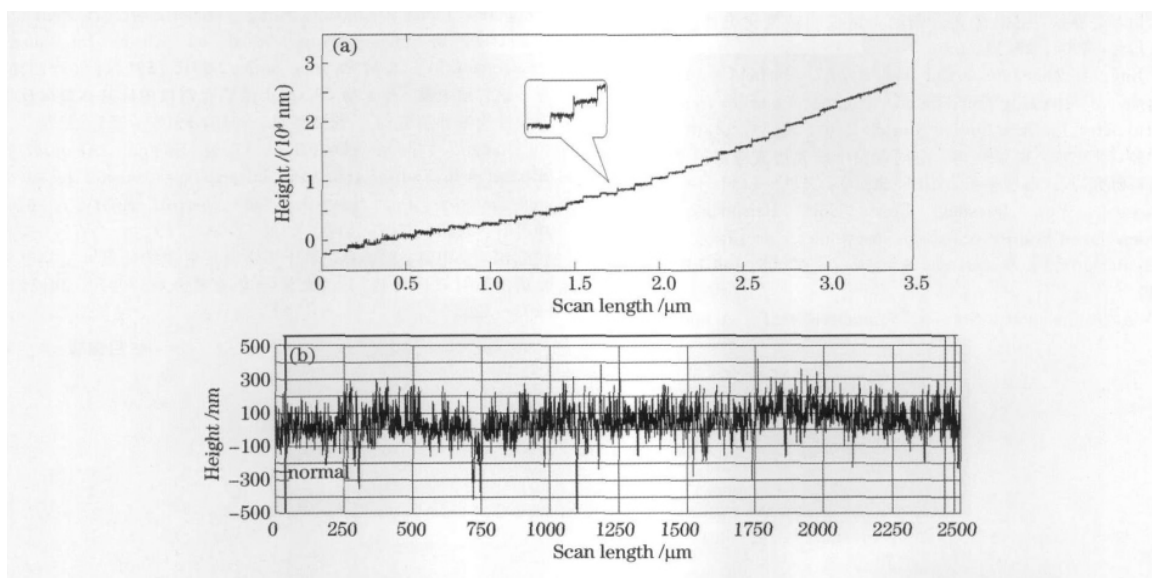


图 7 多级微反射镜阶梯高度(a)及反射面表面粗糙度(b)的台阶仪测试图

Fig. 7 Tested steps height (a) and roughness of the reflecting surface (b) in multi-micromirrors by KLA-Tencor P-16+ profile

10  $\mu\text{m/s}$ ,扫描频率为 50 Hz,得到多级微反射镜表面粗糙度均方根值为 90.23 nm。二者都低于误差容限值,满足设计要求。

## 5 结 论

研究了基于多级微反射镜的空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪的关键器件——多级微反射镜,并对其台阶高度及反射面表面粗糙度的误差容限值进行了模拟分析。然后,结合 MEMS 精确定位优势,采用多次光刻-电镀方法制作了第一级微反射镜。测试结果表明,多级微反射镜反射面粗糙度 RMS 值为 90.23 nm,台阶高度误差值在  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  范围内,基本满足系统的设计要求。

## 参 考 文 献

- Li Zhiqiang, Wang Shurong, Li Futian. Fourier transform spectrometer for ultraviolet and vacuum ultraviolet regions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(4): 459~462  
李志刚,王淑荣,李福田. 紫外-真空紫外傅里叶变换光谱仪[J]. *光学学报*, 2001, **21**(4): 459~462
- Ju Hui, Wu Yihui. The state of art of micro spectrometers[J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2001, **9**(4): 372~376  
鞠 挥,吴一辉. 微型光谱仪的发展现状[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(4): 372~376
- Shi Dongfeng, Hui Mei, Wang Dongsheng *et al.*. Micromation and applications of spectrometers[J]. *Optical Technique*, 2003, **29**(1): 13~16  
史俊锋,惠 梅,王东生等. 光谱仪的微型化及其应用[J]. *光学技术*, 2003, **29**(1): 13~16
- Kong Yanmei, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *et al.*. The developments of the micro modulating spectrometers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(1): 1~5  
孔延梅,梁静秋,梁中翥等. 调制光谱仪的微型化进展[J]. *半导体光电*, 2008, **29**(1): 1~5
- Gao Jing, Ji Zhongying, Cui Yan *et al.*. Outfield calibration analysis of spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1311~1326  
高 静,计忠瑛,崔 燕等. 空间调制干涉光谱成像仪的室外定标技术研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1311~1326
- Kyoungsik Yu, Daesung Lee, Uma Krishnamoorthy. Micromachined Fourier transform spectrometer on silicon optical bench platform[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, **130-131**: 523~530
- Lei Wu, Andrea Pais, Sean R. Samuelson *et al.*. A miniature Fourier transform spectrometer by a large-vertical-displacement microelectromechanical mirror [J]. *Fourier Transform Spectroscopy (FTS) 2009 paper*; FWD4
- Vladislav Jovanov, Jordan Ivanchev, Dietmar Knipp. Standing wave spectrometer [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(2): 426~438
- Bruno Martin, Alain Morand, Pierre Benech *et al.*. Design of a compact static Fourier transform spectrometer in integrated optics based on a leaky loop structure[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(2): 184~186
- Tian Erming, Zhang Jilong, Li Xiao *et al.*. Study on miniature static Fourier transform spectrometer used in laser warning receiver [J]. *Spectrosc. & Spectral Analy.*, 2009, **29**(3): 853~857  
田二明,张继龙,李 晓等. 激光告警系统中中小型静态傅里叶变换光谱仪的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(3): 853~857
- Yu Benguo, Wang Jianzhong. Research on spectrum detection with non-scanning spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2001~2005  
余本国,王建中. 基于非扫描式干涉仪的光谱探测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2001~2005
- Xiong Wei, Shi Hailiang, Wang Yuanjun *et al.*. Study on near-infrared spatial heterodyne spectrometer and detection of water vapor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1511~1515  
熊 伟,施海亮,汪元钧等. 近红外空间外差光谱仪及水汽探测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1500~1515
- Frédéric Gillard a, Nicolas Guérineau a, Sylvain Rommeluère *et al.*. Fundamental performances of a micro stationary Fourier transform spectrometer[C]. *SPIE*, 2010, **7716**: 77162E1~11
- Kong Yanmei, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu *et al.*. Micro assembled Fourier transform spectrometer [C]. *SPIE*, 2009, **7283**: 728304-1~5
- Kong Yanmei, Liang Jingqiu, Wang Bo *et al.*. The investigation and simulation of a novel spatially modulated micro-Fourier transform spectrometer [J]. *Spectrosc. & Spectral Analy.*, 2009, **29**(4): 1142~1146  
孔延梅,梁静秋,王 波等. 新型空间调制微型傅里叶变换光谱仪的设计与仿真[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(4): 1142~1146
- Wang Bo, Liang Zhongzhu, Kong Yanmei *et al.*. Design and fabrication of micro-mirrors based on silicon for micro-spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 907~912  
王 波,梁中翥,孔延梅等. 用于微型光谱仪的硅基多级微反射镜设计与制作研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 907~912
- Fu Jianguo, Liang Zhongzhu, Liang Jingqiu. Analysis of diffraction in Fourier transform infrared spectrometer based on step mirrors [J]. *Spectrosc. & Spectral Analy.*, 2010, **30**(12): 3203~3207  
付建国,梁中翥,梁静秋. 基于多级微反射镜的傅里叶变换红外光谱仪衍射效应分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(12): 3203~3207

栏目编辑:韩 峰