

电热式微机电系统微镜傅里叶变换红外光谱仪

陆安江^{1,2}, 张正平¹, 白忠臣², 陈巧³, 秦水介²

- (1. 贵州大学 大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州省光电子技术及应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025;
3. 无锡微奥科技有限公司, 江苏 无锡 214135)

摘要: 为了研制小体积、低成本、高分辨率的微型傅里叶变换红外光谱仪, 通过选择电热式微机电系统(MEMS)微镜作为迈克尔逊干涉仪动镜, 在满足了傅里叶光谱仪小型化、便携化的同时, 利用折叠双 S 型 Bimorph 驱动结构来实现双倍位移量以确保较高分辨率, 并将分束器外置来进行不同波段的灵活选择, 进而实现全光谱范围的应用。以 1 310 nm 激光作为参考光光源, 钨灯宽带光作为待测光源信号, 通过信号采集、滤波、插值、光谱恢复步骤完成原始信号采集到光谱信号复原的过程。测试结果表明: 电热式微镜的位移量可达到 500 μm , 光谱理论分辨率 1 nm, 光谱仪整机尺寸小至 62 mm \times 62 mm \times 28 mm。测试基线噪声为 0.000 04, 基线重复性为 0.000 32, 吸光度重复性为 0.000 48。性能指标能满足食品安全、药品检测、石油化工等领域的光谱检测应用。

关键词: 电热驱动; MEMS 微镜; 傅里叶变换红外光谱仪; 基线噪声; 吸光度

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0520007

Fourier transform infrared spectrometer based on electro-thermal MEMS micro-mirror

Lu Anjiang^{1,2}, Zhang Zhengping¹, Bai Zhongchen², Chen Qiao³, Qin Shuijie²

- (1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China.
2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Application, Guiyang 550025, China.
3. WiO Technologies Co., Ltd., Wuxi 214135, China)

Abstract: In order to develop the small, low-cost, high-resolution spectrometer, a miniaturization Fourier transform infrared spectrometer was design. By selecting electro-thermal MEMS micro-mirror as the moving mirror of Michelson interferometer to make the Fourier spectrometer miniaturization and portability. At the same time, to ensure a higher resolution, the folding double S Bimorph drive structure of double displacements was designed. The beam splitter was external for selection different wave band flexibly to achieve full spectrum range. Moreover, it used 1 310 nm laser as a reference light source, and tungsten lamp as interference light signal, through the signal acquisition, filtering, interpolation and spectrum recovery steps to complete that signal collected and absorption spectra recovery process. The results show that the displacement of electro-thermal micro-mirror can reach 500 μm , and the theoretical

收稿日期: 2015-09-05; 修订日期: 2015-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(11204046); 国际合作研究项目(2014DFA00670); 国家仪器研究专项基金(2011YQ03012407)

作者简介: 陆安江(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电子技术应用方面的研究。Email: 39146565@qq.com

通讯作者: 秦水介(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电子激光方面的研究。Email: shuijie_qin@sina.com

resolution of the spectrum can be up to 1 nm, and the spectrometer machine size as small as 62 mm×62 mm×28 mm. Also the test results show that the baseline noise is 0.000 04, the repeatability of baseline is 0.000 32 and repeatability of absorbance is 0.000 48. The performance can meet spectrum detection applications of the food safety, drug testing, petrochemical and other fields.

Key words: electro-thermal actuation; MEMS micro-mirror; Fourier transform infrared spectrometer; base-line noise; absorbance

0 引言

光谱仪是一种通过光谱信息分析物质对光作用特征的仪器,可检测不同物质化学组分光谱信息。16 世纪牛顿发现了太阳光的色散现象,利用棱镜将太阳光成功分成几种不同颜色的光,奠定了光谱学的基础。18 世纪克西霍夫(Gustav Robert Kirchhoff)设计了世界上第一台光谱仪^[1]。随着光学、电子学、计算机科学以及先进的半导体技术发展,各种形式的光谱仪逐渐出现在人们的生活中。光谱学已经成为一门独立的研究学科,而光谱仪也成为光谱学的基本的测量工具广泛应用在各领域中^[2]。

传统型光谱仪受体积和成本的制约,除实验室分析外,未得到广泛的推广与应用。伴随着微机电系统(Micro-electromechanical Systems, MEMS)技术的兴起,国内外对基于 MEMS 的傅里叶光谱仪研制不断探索^[3-4]。程梁等人研究了 CCD 探测器的紫外增强方法,并利用表面荧光增强方法实现了 200~1 100 nm 波段光谱产品^[1];中国科学院西安光学精密机械研究所研制了转镜式傅里叶变换光谱仪,但是由于前者需要借助荧光增强而使系统使用复杂性加大,后者受光程非线性影响较大,未能得到较好的推广应用^[5]。瑞士 Neuchatel 大学设计了一款静电式迈克尔逊干涉仪,利用静电梳齿结构驱动微镜在面外移动,通过微镜一定频率的轴向运动实现光的调制。镜子最大位移为 38.5 μm,在 500 nm 处分辨率约为 6 nm,由于其镜子位移量较小,设计出的仪器分辨率较低^[6]。Si-ware 公司利用静电驱动方式在面内推动微镜的方案打破了传统静电力产生位移小的问题,动镜位移最大可达 500 μm,理论分辨率接近 1 nm^[7]。其将整体器件全部在硅片上加工,抗震性能较好,利用光纤输入输出使用十分方便。但是由于半导体工艺在纵向刻蚀上很难做到平整度很好,并且无法实现镀膜,因此这种情况下的反射镜镜面反射率很难做的很高。另外系统中分束器采用硅片实现,很难应

用在较宽的波段上,尤其是红外波段上。

用电热式驱动 MEMS 微镜,采用双金属效应进行一体化方案设计,应力方向主要表现在面外方向,微镜的位移可以达到 1 mm,利用该微镜实现的微型光谱仪理论分辨率可达 0.5 nm^[8]。文中采用电热式 MEMS 微镜作为干涉模块中的动镜,通过差分驱动的方式可以实现原来双倍的位移量,使分辨率更高,分束器采用外置方式,根据不同的波段要求选择不同材料的分束器,可以实现不同波段的光的干涉,因此可应用在全光谱范围内。

1 傅里叶光谱仪原理

傅里叶变换光谱仪(Fourier Transform Spectrometer, FTS)以迈克尔逊相干原理为基础,光经分光镜分为两束,一束反射到固定镜,再沿原方向返回,另一束透射至动镜后再沿原方向返回到分光镜,动镜平移使两束光产生光程差相遇从而实现干涉。FTS 通过探测器得到一个强度变化的余弦信号。当连续改变光程时干涉条纹的强度变化得到干涉图,利用傅里叶变换恢复谱函数^[9]。在光谱测量中,对于检测器检测到的单色光干涉信号只有余弦调制项的贡献是主要的,所以单色光通过理想的干涉仪得到的干涉图为:

$$I(\delta)=0.5I(\nu)\cos(2\pi\nu\delta) \quad (1)$$

式中: $I(\nu)$ 表示波数为 ν 的单色光源的光强,波长 λ 与波数 ν 的关系为 $\nu=1/\lambda$; δ 为光程差。检测器检测到的干涉强度不仅正比于光源强度,而且正比于分束器的效率、检测器的响应和放大器的特性,因此方程乘以一个与波数有关的比例因子 $H(\nu)$ 有:

$$I(\delta)=0.5I(\nu)H(\nu)\cos(2\pi\nu\delta) \quad (2)$$

设 $0.5I(\nu)H(\nu)=B(\nu)$, 则:

$$I(\delta)=B(\nu)\cos(2\pi\nu\delta) \quad (3)$$

式中: $B(\nu)$ 为修正后的单色光源强度。 $I(\delta)$ 被称为 $B(\nu)$ 的傅里叶变换,光谱从干涉图 $I(\delta)$ 的傅里叶变换得到。当光源为单色光时,测得的干涉图是单色光干涉

图之和,当光源是一个连续光源时,干涉图用积分形式表示,即对单色光干涉图方程进行积分

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu\delta) d\nu \quad (4)$$

为了得到光谱图,对公式(4)进行傅里叶逆变换,又因为 $I(\delta)$ 为偶函数,所以:

$$B(\nu) = 2 \int_0^{\infty} I(\delta) \cos(2\pi\nu\delta) d\delta \quad (5)$$

2 MEMS 微镜傅里叶光谱仪设计

2.1 MEMS 微镜选择

在系统设计中,为得到较高分辨率,同时考虑到微光谱仪的实用性和经济性,采用电热式驱动 MEMS 微镜为迈克尔逊干涉仪动镜。其采用一种独特的电热式折叠双 S 型 Bimorph(双层材料梁)驱动结构,如图 1 所示^[10],垂直位移比其他驱动方式

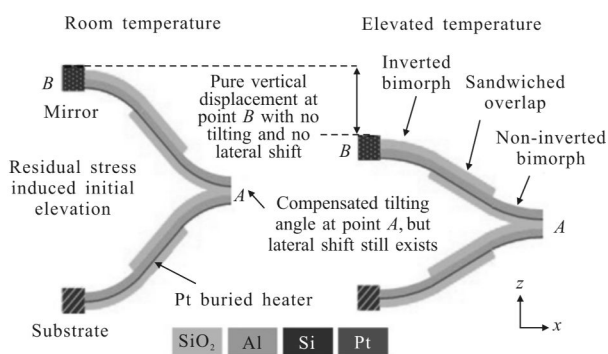


图 1 折叠双 S 型结构

Fig.1 Structure of folding double S bimorph

的 MEMS 微镜器件大一到两个数量级,主要优势表现为大镜面、大位移、低驱动电压等,微镜器件 SEM 如图 2 所示。

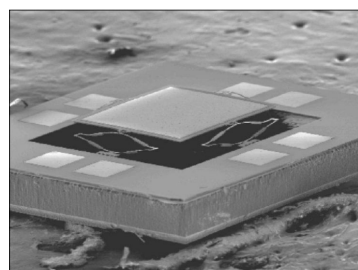


图 2 MEMS 微镜 SEM 图

Fig.2 SEM of MEMS micro-mirror

芯片镜面直径为 1.5 mm,当四组驱动臂同时驱动产生垂直位移,镜面物理位移大于或等于 500 μm ,在实际应用中,由于微镜采用折叠双 S 驱动模式可实现双倍位移量,在选择时可选择单方向位移量为 250 μm 的微镜。

2.2 傅里叶微光谱仪设计

基于 MEMS 微镜的傅里叶光谱仪系统设计如图 3 所示。由干涉模块、样品池、探测器、数字信号处理单元与显示单元几个部分组成。其中,探测器选用 Thorlabs 的硫化铅红外探测器 PbS-030,在 0.8~2.6 μm 的波长范围内,提供快速响应时间、一致性好、极好的灵敏度及长时间工作的稳定性。微镜通过差分驱动的方式,分束器采用外置方式,根据不同的波段要求选择不同材料的分束器^[11],两个 MEMS 微

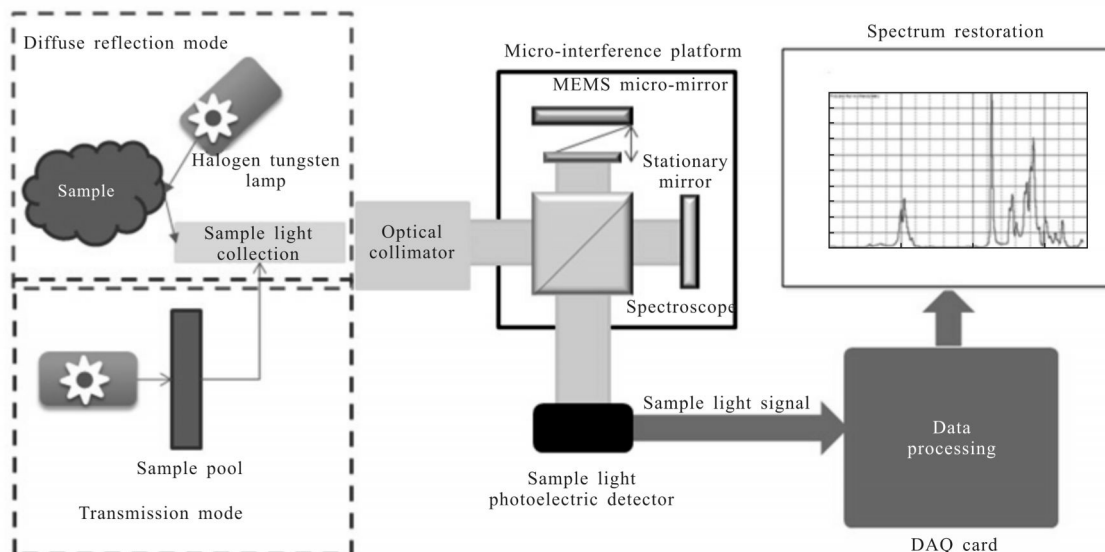
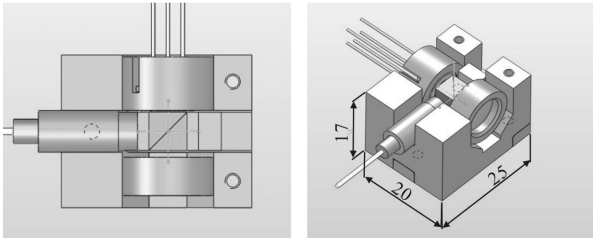


图 3 傅里叶微光谱仪设计

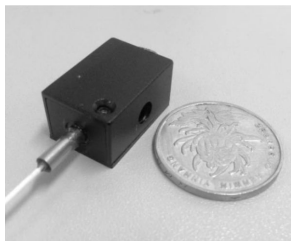
Fig.3 Design of miniature Fourier transform spectrometer

镜采用双金属变形效应, 初始位置即可实现显微镜垂直于底面。

基于 MEMS 显微镜的傅里叶变换光谱仪以 MEMS 器件为核心, 系统中利用 MEMS 搭建的微型迈克尔逊干涉平台, 通过 FT 算法实现分光测谱。微干涉平台如图 4 所示, 体积为 2.2 cm×1.8 cm×1 cm, 甚至更小。通过该方法设计的微干涉平台体积小, 镜面反射率高, 扫描频率快, 扫描位移大。



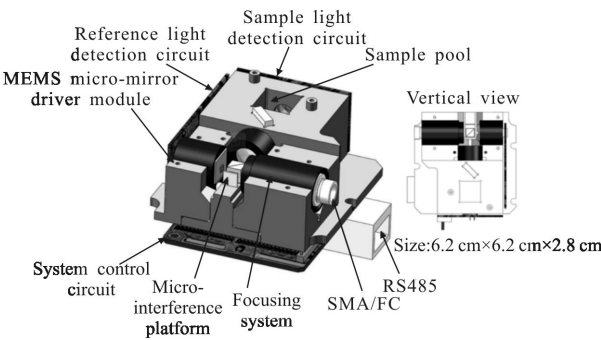
(a) 前端设计 (a) Front-end (b) 模块组装 (b) Assemble module



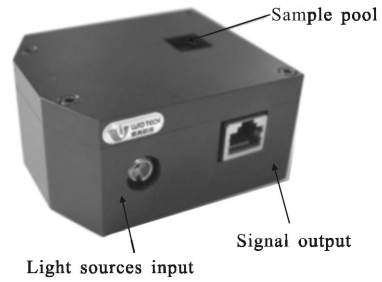
(c) 微干涉仪实物 (c) Micro-interference

图 4 微干涉仪

通过光-机-电模块化设计, 得到微光谱仪结构如图 5 所示, 上述方法设计出的整机尺寸为 6.2 cm×6.2 cm×2.8 cm。微型干涉模块中显微镜移动位移大, 线性度较好。



(a) 设计结构图 (a) Structure of spectrometer



(b) 微光谱仪 (b) Miniature spectrometer

图 5 微光谱仪结构与实物

Fig.5 Structure and real figure of miniature spectrometer

2.3 信号处理

基于 MEMS 显微镜的傅里叶红外光谱信号处理流程如图 6 所示, 通过信号采集-滤波-插值-光谱复原等信号处理步骤, 完成从原始信号采集到吸收光谱信号复原的过程^[12]。

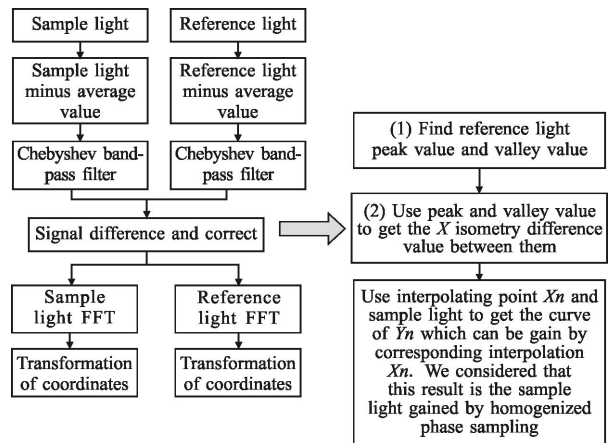


图 6 光谱信号处理流程图

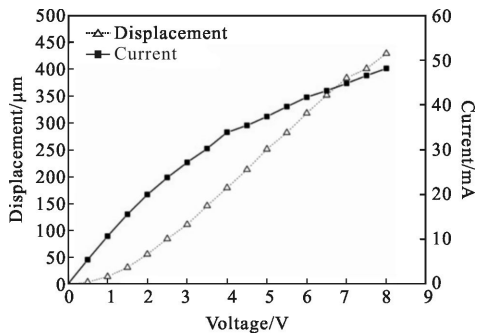
Fig.6 Flow chart of spectrum signal processing

在信号处理过程中, 首先以 1 310 nm 激光作为参考光、以钨灯宽带光作为待测光光源信号进行采样, 获取干涉信号。接着利用 Matlab 中的低通、高通滤波程序对参考光、待测光进行滤波处理, 滤去干涉信号中的光源信号, 截取干涉调制信号。再采用 Matlab 中样条插值法(Spline)对参考光 λ_r 进行插值, 在最大值与最小值之间进行等光程差插值, 按空间相位每段取 9 个点, 每两点间光程差为 $\lambda_r/20$, 实现对待测光的定标处理。最后, 对插值抽样后的待测信号进行 FFT 变换, 实现光谱复原。

3 结果与分析

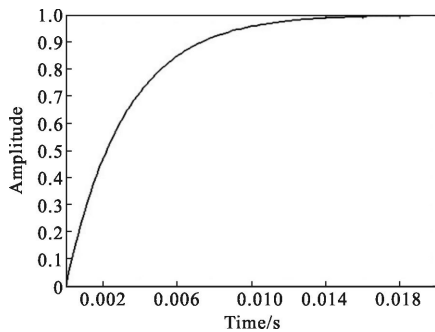
3.1 MEMS 显微镜动态特性分析

MEMS 显微镜驱动采用独立驱动与同时驱动方式,当 4 组驱动器同时施加同一电压信号时,镜面产生垂直方向 Z 轴位移,通过实际测量,电压、电流与位移如图 7(a)所示。MEMS 显微镜的动态特性如图 7(b)、7(c)所示,MEMS 显微镜的动态响应时间约为 1.7 ms,25ms 后热机械响应达理想值区间。电热式显微镜位移大,易于调整,线性度较好,根据不同材料的



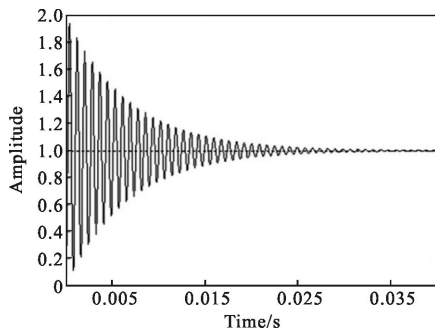
(a) 电压、电流与位移

(a) Relationship of voltage, current and displacement



(b) 电-热响应

(b) Electrical and thermal response



(c) 热-机械响应

(c) Thermal-mechanical response

图 7 动态特性曲线

Fig.7 Curves of dynamic characteristics

分束器可以实现不同波段的光的干涉,因此可应用在全光谱范围内。

3.2 干涉信号与分辨率

FTIR 光谱仪中关键的部件是动镜,系统的分辨率与显微镜的位移成正比,在微型光谱仪的设计过程中,显微镜位移影响着光谱仪的干涉信号频率和光谱分辨率。

(1) 干涉信号频率

显微镜位移 $x=x_0\sin(\omega t)$,其速度 $v=\omega x_0\cos(\omega t)$ 。对于行程为 $500\ \mu\text{m}$ 的显微镜, $x_0=250\ \mu\text{m}$,如果扫描频率为 $10\ \text{Hz}$,则最大速度 $v_m=\omega x_0=2\pi(10)\times 250\ \mu\text{m}$ 。则干涉信号频率 $f=2v/\lambda=(2\times 15)/\lambda\ \text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

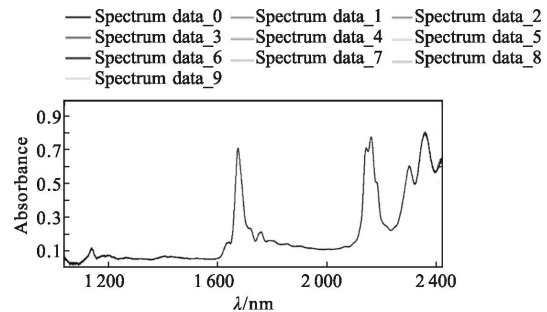
(2) 光谱分辨率

在基于迈克尔逊相干原理中, $\Delta\sigma=1/(2\cdot\Delta z_{\text{max}})$ 或 $\Delta\lambda=\lambda^2\cdot\Delta\sigma=\lambda^2/(2\cdot\Delta z_{\text{max}})$,其中 z_{max} 为可动反射镜扫描位移,所以可动反射镜扫描位移越大,分辨率越高。若显微镜位移为 $500\ \mu\text{m}$,可得光谱分辨率为 $1\ \text{nm}$ 。

3.3 系统性能测验

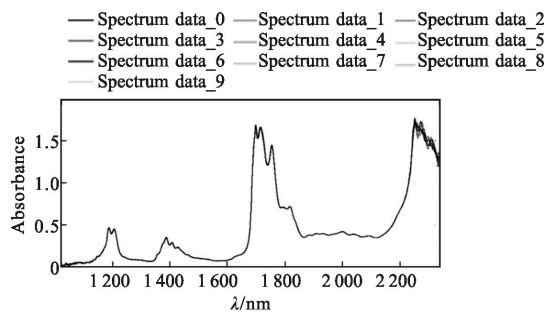
3.3.1 短期性能测试

系统测试性能指标主要通过基线噪声、吸光度重复性、波长重复性、波长准确性来评价。系统预热完毕后以一组参比,多组样品连续采集的方式吸光度谱如图 8 所示。



(a) 10 组聚苯乙烯吸光度谱图

(a) Absorbance spectrum 10 groups of polystyrene



(b) 10 组正己烷吸光度谱图

(b) Absorbance spectrum 10 groups of n-hexane

图 8 样品吸光度谱图

Fig.8 Sample absorbance spectrum

(1) 通过样品数据采集,以两组参比强度谱换算得到指定波长区间内的基线数据,将每组数据以最小二乘法拟合直线方程拟合获得每个区间的偏差水平,从而得到基线噪声:

$$N_{\text{baseline}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n} \quad (6)$$

(2) 以一组参比, n 组参比光谱线计算得到 n 组基线数据。计算 n 组吸光度数据,求每个波长的标准偏差,对所有波长的标准偏差求平均得吸光度重复性:

$$I_{\text{wave}}/n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} / n \quad (7)$$

(3) 针对实际标准样品的特征峰,从每组吸光度谱线上,搜索得到实际吸光度数据中横坐标最接近标准特征峰的波长 λ_i ;对每组吸光度得到的波长 λ_i 计算标准偏差,得波长重复性:

$$I_{\text{wave}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (8)$$

对每组吸光度得到的波长 λ_i 求平均值后与标准波长相减计算偏差,得波长准确性:

$$A_{\text{wave}} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} - \lambda_s \quad (9)$$

式中: λ_s 为标准波长。

利用上述计算方法得出基线噪声为 0.000 04,基线重复性为 0.000 32,吸光度重复性为 0.000 48。从吸光度谱来看,图谱形状正常,并且重合度较好,根据计算,波长重复性和波长准确性在短期内比较理想。

与 Si-ware 的 FTIR 测试结果比照如图 9 所示。

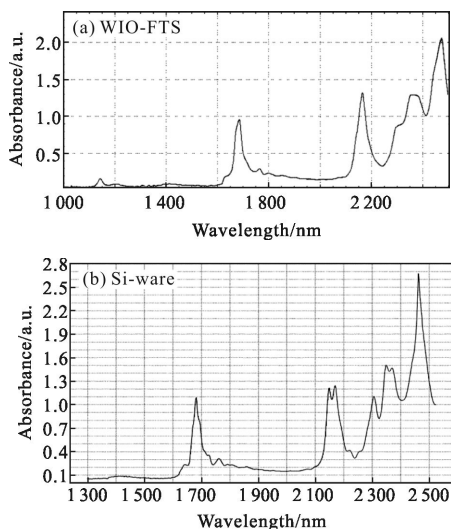


图 9 聚苯乙烯样品吸光度比较

Fig.9 Polystyrene sample absorbance spectrum

测试中针对聚苯乙烯样品,采用 1 参 1 样进行吸光度谱测试,从图中可以看出聚苯乙烯的光谱形状在 1681 nm 附近的峰形状扭曲,长波位置由于分辨率较差,得不出具体包络信息,且波长准确性有较大偏移(插值导致)。

3.3.2 基线恶化测试

基线恶化采用参比板进行连续多组基线光谱测试,单组测量测试 40 次取平均值作为测试结果,组间测试时间间隔为 38 s,连续测试 n 组后取基线重复性超过 0.001 时对应的测量时间长度作为基线恶化时间。从图 10 中可以看到,第 47 组基线重复性超标,基线恶化时间为 28.5 min。

3.3.3 误差分析

从整个仪器的测试来看,波长重复性问题随着实时标定的引入而得到进一步解决,吸光度重复性短期内较好,但随着时间的增加出现恶化。经过分析,短期指标可满足要求,说明软件处理过程不会出现明显的异常情况,重点在 MEMS 与其结合部件,如 (1) MEMS 本身面型重复性;(2) 驱动信号重复性;(3) MEMS 驱动电阻热功率重复性等将会对整机性能产生一定影响。综上所述,基于电热式微镜研制的微光谱仪将进一步加强系统反馈控制,通过实时温度补偿来提高系统稳定性。

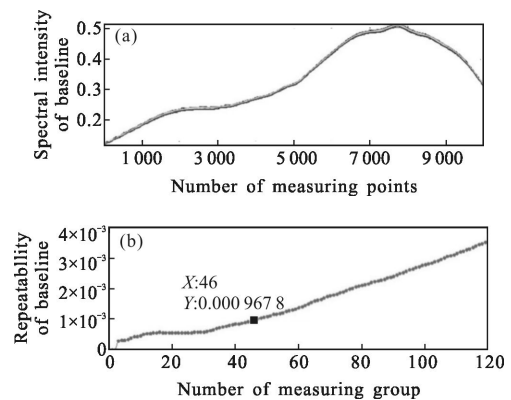


图 10 基线恶化测试结果

Fig.10 Results of baseline deterioration

4 结论

电热式驱动 MEMS 微镜在满足了傅里叶红外光谱仪小型化、便携化的同时,通过差分驱动的方式来实现双倍位移量,理论上可以使分辨率达 1 nm。将分束器外置来进行不同的波段的灵活选择,进而实现全光谱范围的应用。通过上述方法的微型光谱

仪基线噪声为 0.000 04, 基线重复性为 0.000 32, 吸光度重复性为 0.000 48, 基本能满足食品安全、药品检测、石油化工等领域的日常应用。但是, 由于环境温度对电热式微镜的位移量会产生一定的影响, 造成微镜面型倾斜, 对于高分辨光谱仪而言将导致基线噪声和基线重复性随时间增加而出现指标恶化, 需要通过温度补偿、光路优化等方式改进来提高稳定性与可靠性。

参考文献:

- [1] Chen Liang. Research and application of the micro spectrometer system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 1-15. (in Chinese)
- [2] Khalil Diaa, Omran Hitham, Medhat Mostafa, et al. Miniaturized tunable integrated Mach-Zehnder MEMS interferometer for spectrometer applications [C]//SPIE, 2010, 7594(5): 155-179.
- [3] Yu K, Lee D, Krishnamoorthy U, et al. Micromachined Fourier transform spectrometer on Silicon optical bench platform [C]//The International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, IEEE, 2005: 523-530.
- [4] Wang Yongqing, Ma Wen, Lou Jianzhong, et al. Investigation and progress of microspectrometer based on micro electro mechanical system [J]. *Metallurgical Analysis*, 2006, 26(4): 43-44. (in Chinese)
- [5] Yang Xiaoxu, Zhou Sizhong, Xiangli Bin, et al. Studies on nonlinearity of optical path difference of rotary Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(10): 1388-1392. (in Chinese)
- [6] Khalil D, Sabry Y, Omran H, et al. Characterization of MEMS FTIR spectrometer [C]//MOEMS and Miniaturized Systems, SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2011, 7930: 876124.
- [7] Wu Lei, Pais A, Samuelson S R, et al. A miniature Fourier transform spectrometer by a large-vertical-displacement microelectromechanical mirror [C]//Fourier Transform Spectroscopy, Optical Society of America, 2009.
- [8] Wu Lei, Xie Huikai. A large vertical displacement electrothermal bimorph microactuator with very small lateral shift [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2008, 145-146 (7): 371-379.
- [9] Weng Shifu. Fourier Transform Infrared Spectroscopy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [10] Pal S, Xie Huikai. Analysis and fabrication of curved multimorph transducers that undergo bending and twisting[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21 (5): 1241-1251.
- [11] Chen Qiao, Xie Huikai, Zhou Liang. A optical interference platform and assembly method with MEMS: China, 103063130A, 2013-04-24. (in Chinese)
- [12] Zhang Ning, Liu Yulong, Wu Jiahui, et al. Design of CCD data acquisition system of miniature spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 142-145. (in Chinese)