

双摆式动镜干涉仪的设计

石磊^{1,2*}, 孙长库¹, 夏恒新², 李岩松²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津

²天津捷强动力装备股份有限公司, 天津

收稿日期: 2024年6月19日; 录用日期: 2024年7月15日; 发布日期: 2025年3月12日

摘要

用于工业现场的傅里叶变换红外光谱仪往往要求具备与实验室设备相近的性能指标, 且对体积、重量、抗震等方面的要求更为严格。在完美地利用立体角镜与平面折返镜组合的光学特性基础上, 设计了一种高效稳定双摆式的干涉仪结构, 能够从原理上解决干涉仪调制度稳定性的问题。通过对动镜扫描系统的分析建模, 建立动镜扫描速度与驱动器之间的数学关系, 并利用数字信号处理器实现对其的闭环控制, 使扫描误差大约在 $\pm 0.2\%$ 的范围内。通过对仪器性能的测试以及标准样品的测试表明, 仪器具有较高的信噪比与稳定性, 能够满足工业应用的需求。

关键词

FTIR, 干涉仪, 双摆式动镜, 仪器设计

Design of Interferometer Based on Pendulum Movable Mirror

Lei Shi^{1,2*}, Changku Sun¹, Hengxin Xia², Yansong Li²

¹School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin

²Tianjin Jie Qiang Equipment, Ltd., Tianjin

Received: Jun. 19th, 2024; accepted: Jul. 15th, 2024; published: Mar. 12th, 2025

Abstract

When FTIR is used in industrial applications, it often requires performance similar to laboratory equipment, and is more stringent in terms of volume, weight, and seismic resistance. A highly efficient and stable pendulum structure interferometer based on the combination of cube corner mirror and planar retro-mirror was designed, the combination of cube corner mirror and flat retro-

*通讯作者。

文章引用: 石磊, 孙长库, 夏恒新, 李岩松. 双摆式动镜干涉仪的设计[J]. 仪器与设备, 2025, 13(1): 38-45.

DOI: 10.12677/iae.2025.131006

mirror is a perfect solution for interferometer modulation depth issues, because of their own optical characteristics, in principle, tilts and shift would have no effect on the modulation depth. Through the analysis and modeling of the moving mirror scanning system, the mathematical relationship between the scanning speed and the driver is established, and a closed-loop control is realized by using the digital signal processor so that the scanning error is about $\pm 0.2\%$. Through the test of the performance of the instrument and the test of some standard samples shows that the instrument has a good signal to noise ratio and stability, to meet the needs of industrial applications.

Keywords

FTIR, Interferometer, Double Pendulum Moving Mirror, Instrument Design

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

傅里叶变换红外光谱仪技术(FTIR)利用迈克耳逊干涉仪,通过傅里叶变换的方式,实现全波段光谱的同时测量,但由于光的干涉会受到光路不准直性的影响[1][2],动镜扫描机构需在往复运动时,始终保持高度准直,对仪器的光机结构及运动控制都有很高的要求,从而导致仪器的使用环境受限、且成本较高。迈克尔逊干涉仪是 FTIR 的核心部件,其光路的准直与稳定直接决定了仪器的几乎全部重要性能指标,是决定仪器生与死的关键[3]-[5]。动镜是 FTIR 中的唯一运动部件,其行程与扫描精度决定直接影响仪器的分辨率、信噪比与重复性[3][6][7]。

实验室型 FTIR (如赛默飞、岛津、安捷伦等公司)常采用动态准直的方式来对干涉仪的光路进行实时、动态的准直,从而能够保证仪器的性能;但由于复杂的光机结构和闭环驱动控制,使动态准直型的傅里叶变换红外光谱仪体积较大、重量较重,且容易受到外界震动等因素的影响,而不利于在工业现场应用,也难以做到小型化。

为了满足工业现场的工况,同时保证仪器的性能,Ahura 公司(已被赛默飞收购)利用高精度导轨机构,设计了一款平面镜型的小型干涉仪,能够克服动镜扫描的倾斜问题,实现手持式 FTIR 分析仪的测量。瑞士 Arcoptix 公司利用立体角镜,设计了一款小型干涉仪,搭载电制冷 MCT 探测器,能够应用在实验室及工业红外气体分析仪等领域。

本工作利用立体角镜与平面折返镜相组合的光学结构自身的光学特性,设计了一种自准直型的摆动式干涉仪,不仅结构紧凑,对机械加工要求低,且抗震、防潮,还有更高的动镜扫描效率。

2. 基本原理

2.1. 双摆式干涉仪结构

角镜与平面镜组合的干涉仪结构如图 1 所示,当入射光束传播到分束器/补偿镜(BS/CP)时,由于分束膜的作用,会将入射光束分为透射光与反射光,并将两束光分别传输到两个立体角镜上,立体角镜将光束反射到平面反射镜上,光束再经过平面镜的反射原路返回,从而产生干涉信号。

根据立体角镜的光学特性,当光束传输到立体角镜时,光束会产生 180 度反转(如图 2(a)所示),出射光束的位置和方向不受角镜倾斜角度的影响,而只与角镜顶点和入射光束有关。当角镜产生横移时,出射光束会发生两倍的横移,但经过平面折返镜反射后,光束再次返回立体角镜,且完全沿原入射位置出

射[5]-[7] (如图 2(b)所示)。

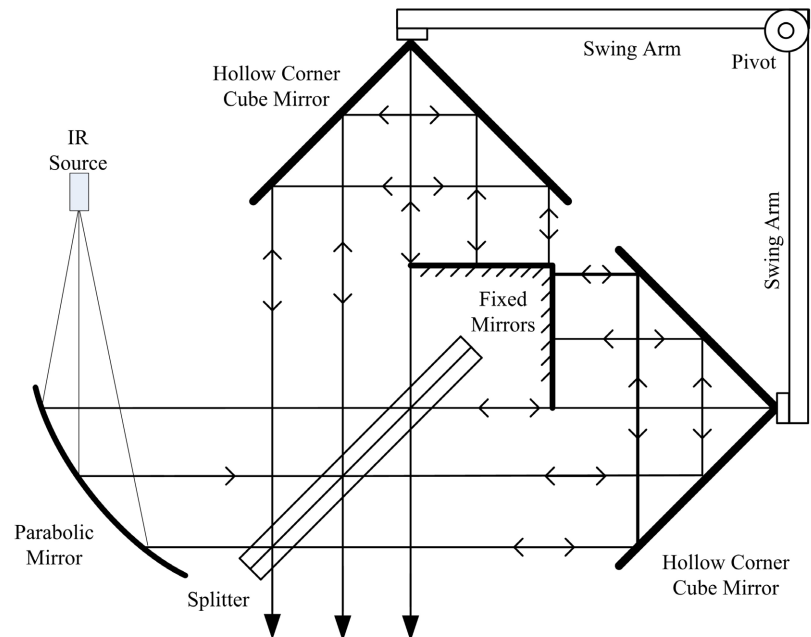


Figure 1. Optical diagram of the interferometer
图 1. 干涉仪的基本结构图

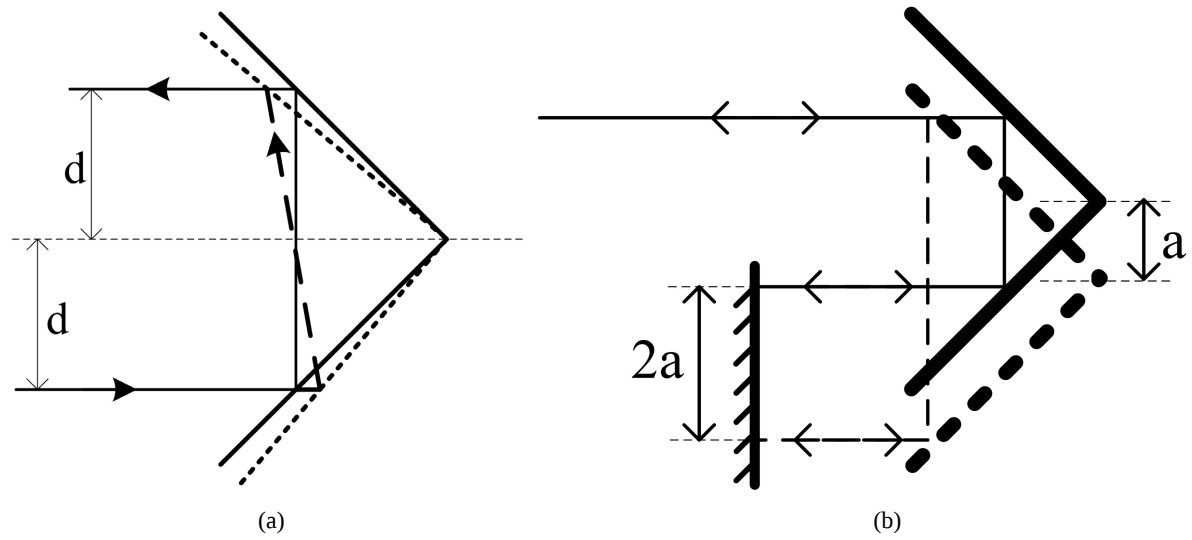


Figure 2. Tilt and shift of the cube corner mirror
图 2. 立体角镜倾斜与横移对出射光的影响

当角镜在摆动臂的带动下产生位移 d 时, 相干的两束光能够产生 8 倍于此位移的额外光程差, 使干涉仪更容易获得高分辨率的光谱。

2.2. 双摆式动镜扫描系统

弹性簧片枢轴、立体角镜、摆动臂及摆动式音圈电机构成了动镜扫描系统, 其机械结构如图 3 所示。音圈电机的定子与摆臂的推动臂固定, 立体角镜与摆动臂固定, 当电压施加在音圈电机上时, 音圈电机

就会摆臂围绕枢轴进行扫描。

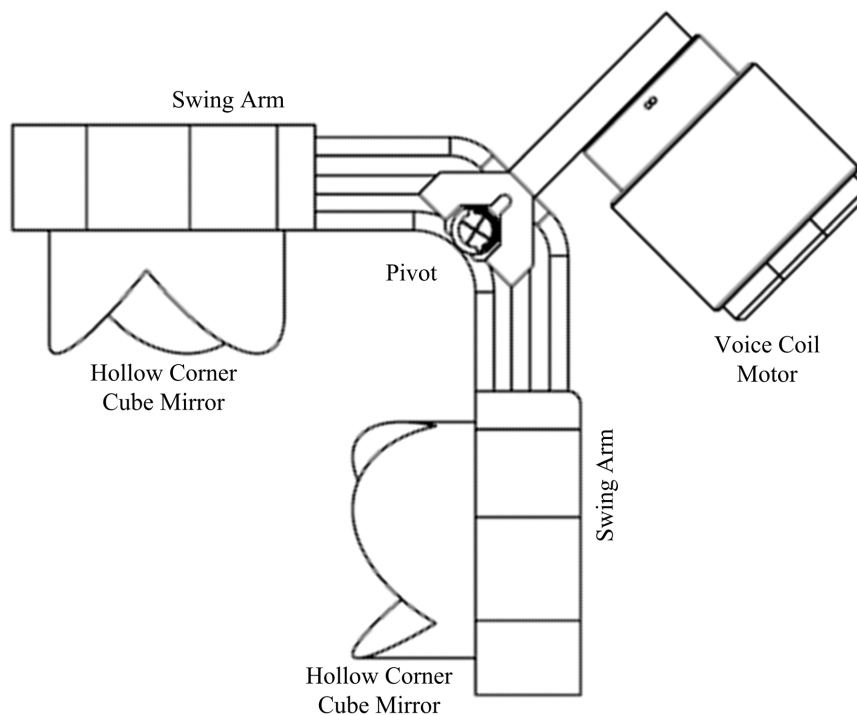


Figure 3. Mechanical diagram of moving mirror scanning system

图 3. 双摆动镜扫描系统的机械结构

弹性簧片枢轴的机械结构模型如图 4 所示，由相互垂直的弹性簧片与支撑体构成，其刚度方程可以表达为[8] [9]：

$$K_{\theta M} = n \cdot EI / L \quad (1)$$

其中， E 为弹性金属材料的弹性模量， n 为弹性枢轴簧片的个数， L 为材料长度， I 为截面惯性矩。可以得到枢轴转动角度与其所受力矩之间的关系。

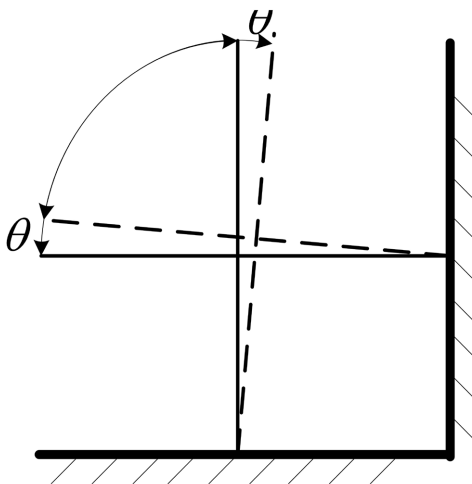


Figure 4. Model of a flex cross-spring pivot

图 4. 弹性簧片枢轴的模型

3. 动镜扫描系统的驱动控制

3.1. 控制模型

音圈电机的线圈在受到电压激励时,根据安培定律,在线圈中会产生相应的电流,从而产生安培力,推动摆动臂转动[10][11],产生一定大小的转动力矩:

$$M = B_{\delta} i(t) l C \quad (2)$$

式中, B_{δ} 为音圈电机磁场的磁感应强度, l 为音圈电机线圈中导体的有效长度, $i(t)$ 为所通过的有效电流, C 为有效力臂长度。

根据弹性枢轴与电机的电学、力学方程,可以建立该扫描机构的运动方程:

$$\begin{cases} M = K_{\theta M} \cdot \theta \\ x = 2D \sin \theta \\ \theta = \int_0^t \omega d\tau \end{cases} \quad (3)$$

同时,考虑系统的电磁学关系:

$$u(t) = Ri(t) + E_a + L \frac{di(t)}{dt} = Ri(t) + B_{\delta} l v + L \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

此外,角镜的扫描角速度与音圈电机的角速度同步,则有:

$$v_c = D/C \cdot v \quad (5)$$

能够得到光程差变化速度与其驱动电压和所在位置(角度)之间的关系:

$$v_{\text{opd}}(t) = \frac{8D}{C} \cdot \frac{u(t) - R \frac{K_{\theta M} \theta}{B_{\delta} l C}}{B_{\delta} L + \frac{L K_{\theta M}}{B_{\delta} l C \cos \theta}} \quad (6)$$

式中,角镜摆臂 D ,电机转动力臂 C ,音圈电机磁场强度 B_{δ} ,音圈电机线圈回路电感 L ,电机电阻 R ,弹性簧片枢轴 $K_{\theta M}$,电机线圈长度 l 均为已知的参数。

3.2. 控制算法

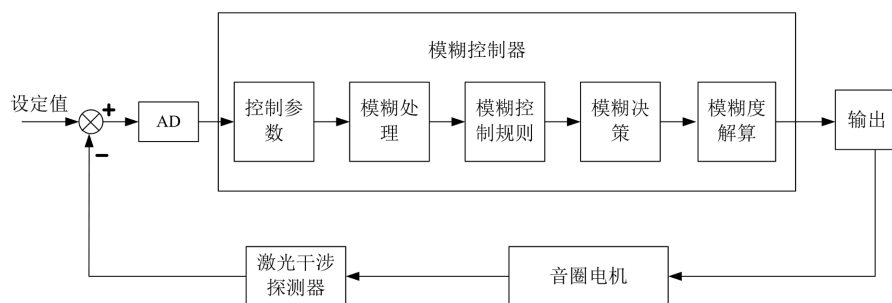


Figure 5. The basic principle block diagram of the fuzzy control

图 5. 动镜系统模糊控制算法

利用得出的模型,只要设定一个预期的光程差变化速度 v_{set} 值,就可以得到所需驱动电压与动镜系统转动角度之间的关系,并设计一种基于模糊控制策略的控制程序。为保证动镜扫描机构的速度均匀性,并确保动镜扫描机构在相位切换时的快速与稳定,结合系统的电学与力学,本工作所设计的控制策略如图 5 所示。

利用数字信号处理器(DSP)技术,实现控制算法,从而对动镜机构的扫描进行精密的闭环控制,设定动镜扫描的控制目标速度为 7.8 KHz,实际控制的结果如图 6 所示,速度误差的均方根值(RMS)与均值之比约为 0.05%。

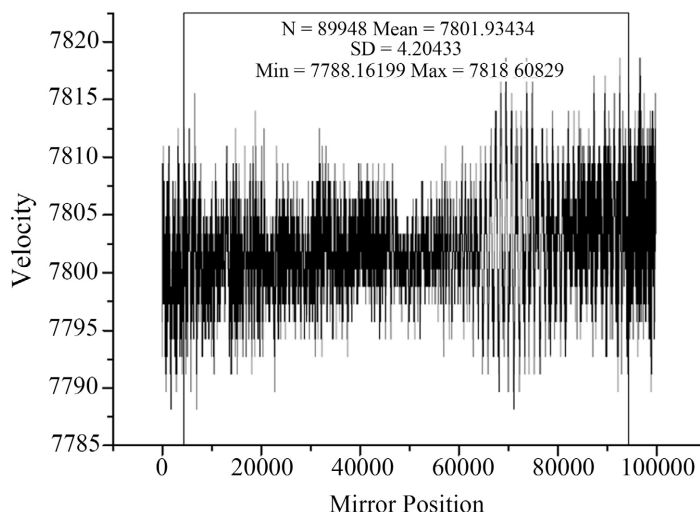


Figure 6. Velocity stability of the driver
图 6. 速度控制效果

4. 仪器测试

4.1. 性能测试

根据傅里叶变换红外光谱仪的国家标准(GBT 21186-2007)的要求和方法,对仪器的光谱范围,信噪比和分辨率进行测试。设置仪器动镜的扫描速度为 7.8 kHz (参考激光的干涉频率),仪器的分辨率为 4 cm^{-1} ,使用热释电探测器(DLaTGS),对仪器的基本性能进行试验。

在实验室环境下,测量以空气背景的单光谱能量分布,结果如图 7(a)所示,可以得到试验仪器的有效光谱范围优于 $(750\sim 4600)\text{ cm}^{-1}$ 。

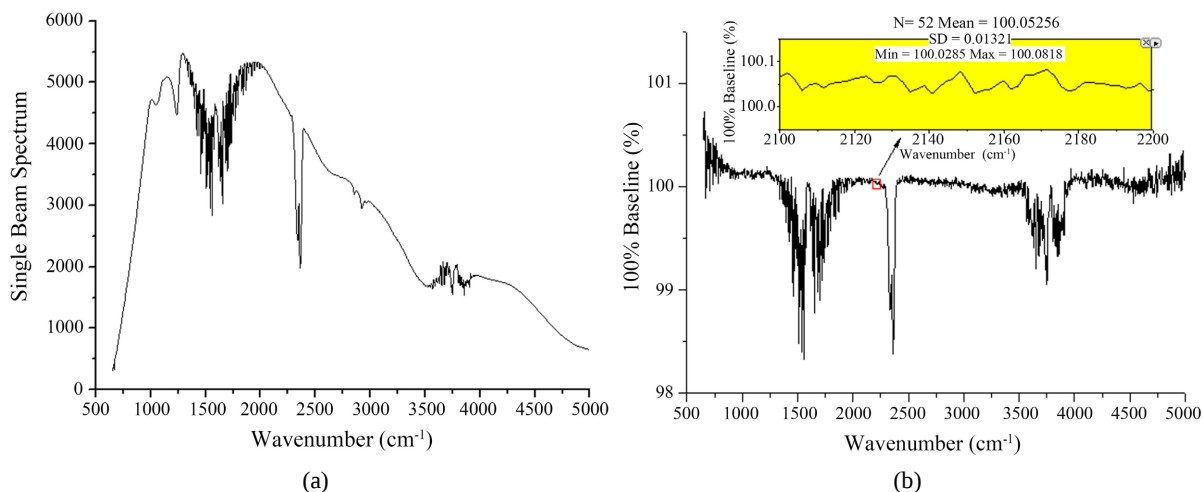


Figure 7. Spectrum range and SNR test
图 7. 光谱范围和信噪比测试

在 4 cm^{-1} 的分辨率的条件下, 使用 DLaTGS 探测器, 采集单次 100% 透射光谱, 得到的实验结果如图 7(b) 所示。选取不受二氧化碳和空气中水汽影响的光谱区间 $(2100\sim 2000\text{ cm}^{-1})$ 对仪器光谱信噪比进行评估, 计算得到, 噪声的 RMS 值约为 0.013%, 即仪器单条光谱的信噪比约为 7600:1。

4.2. 标准样品测试

使用长光程气体池作为仪器的测量附件, 并利用标准气生成设备, 配制一系列不同浓度的 SO_2 气体, 对仪器进行测试。如图 8(a) 所示为, 低浓度 SO_2 气体的吸收光谱图。在该光谱组中, 选取波段范围为 $(1319\sim 1390)\text{ cm}^{-1}$ 的光谱, 依次计算各浓度下 SO_2 的吸光度面积, 并对浓度与面积之间的关系进行线性数值拟合:

$$y = 0.35467 + 7.46171x \quad (7)$$

可以得到, 低浓度的 SO_2 气体与光谱的吸光度面积具有较好的线性关系(结果如图 8(b) 所示), 表明仪器所测得的光谱具有良好的线性度, 能够进行准确的定量分析。

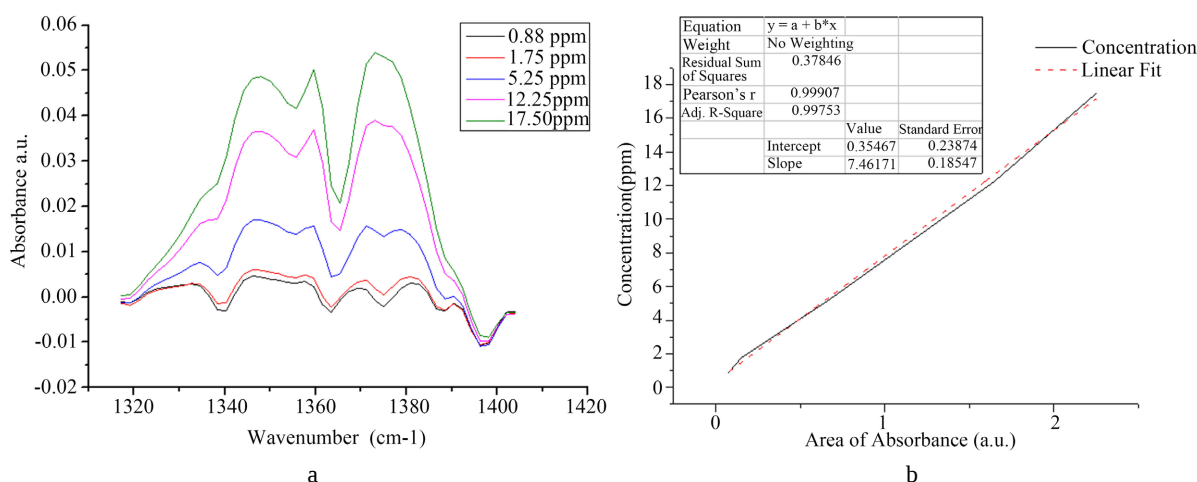


Figure 8. Calibration gas test

图 8. 标准气体测试

5. 结论

本工作所设计的双摆式干涉仪, 从光学原理上解决了干涉仪对于反射镜角度误差的影响, 使仪器能够适应工业现场的环境特点。通过对动镜扫描机构的分析, 设计了一套匀速控制算法, 实现对仪器的高精度控制。通过对仪器基本性能和标准气体的测试, 表明仪器具有较好的信噪比与光谱线性度, 仪器能够满足应用在工业现场的测量需求。

参考文献

- [1] Topsøe, N. (2006) *In Situ* FTIR: A Versatile Tool for the Study of Industrial Catalysts. *Catalysis Today*, **113**, 58-64. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2005.11.010>
- [2] McNab, A.I., McCue, A.J., Dionisi, D. and Anderson, J.A. (2017) Combined Quantitative FTIR and Online GC Study of Fischer-Tropsch Catalysts. *Journal of Catalysis*, **353**, 295-304. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.07.028>
- [3] Pelin Ayerden, N., Aygun, U., Holmstrom, S.T.S., Olcer, S., Can, B., Stehle, J., et al. (2014) High-speed Broadband FTIR System Using Mems. *Applied Optics*, **53**, 7267-7272. <https://doi.org/10.1364/ao.53.007267>
- [4] Mahendra, R., Kumar, D., Satyavir, Nautiyal, B., Meena, J.R., Das, B.K., et al. (2022) Design and Fabrication of Self-Compensating ZnSe Beam Splitter in LWIR Region. *Optik*, **262**, Article ID: 169299.

<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.169299>

- [5] Shi, L., Liu, J., Gao, W., Zhang, Q.X., *et al.* (2015) Design of a Moving Mirror Scanning System in Fourier Transform Infrared Spectrometer. *Acta Photonica Sinica*, **44**, Article ID: 0430002.
- [6] Parmar, K., Indaco, M., Long, R., *et al.* (2021) Design and Analysis of Deployment Mechanics for a Self-Folding, Spiral Based Space-Borne Interferometer. *31st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, 31 January-4 February 2021.
- [7] Shi, L., Li, K., Gao, Z.F., *et al.* (2013) Design of a Compact Structure Interferometer. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, **33**, 2294-2298.
- [8] Jensen, B.D. and Howell, L.L. (2002) The Modeling of Cross-Axis Flexural Pivots. *Mechanism and Machine Theory*, **37**, 461-476. [https://doi.org/10.1016/s0094-114x\(02\)00007-1](https://doi.org/10.1016/s0094-114x(02)00007-1)
- [9] Wang, J.W., Chen, K., Li, J., *et al.* (2001) Precision of Typical Flexible Hinges. *Journal of Tsinghua University*, **41**, 49-52.
- [10] Gräb, P., Geidel, E. and Schmitt, H. (2021) Low-Cost Spectroscopy: Experiments in Various Spectral Ranges. *World Journal of Chemical Education*, **9**, 144-151. <https://doi.org/10.12691/wjce-9-4-7>
- [11] Perri, A. (2021) Visible and Near-Infrared Fourier Transform Spectroscopy with a Common-Path Interferometer. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, **54**, Article ID: 113001. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/ac02d1>