

实用化微型近红外光谱分析仪的设计与性能测试

何文馨^{1,2}, 温志渝^{1,2}, 周颖^{1,2}

¹重庆大学新型微纳器件与系统技术国防重点学科实验室, 重庆 400044;

²重庆大学微系统研究中心, 重庆 400044

摘要 近红外光谱分析作为石油勘探过程中油品成分鉴别的一种重要手段,多年来引起人们的广泛关注和深入研究。针对石油勘探过程中油藏井温度高、空间局促等苛刻环境条件,研制了一种能够在高温环境中连续稳定工作的实用化微型近红外光谱分析仪,其体积为 154 mm×66.5 mm×38 mm。该微型近红外光谱分析仪采用凹面光栅作为分光元件,针对油气特征波段进行理论计算和 Zemax 软件仿真,设计出通量高、杂散光少、成像优质的全息凹面光栅。探测器选用 Hamamatsu 公司二级半导体制冷线阵电荷耦合器件(CCD),通过合理的光路设计和紧凑的结构布局,实现了在 70 °C 的高温环境下稳定工作。通过标定及相关性能测试,结果表明:该微型近红外光谱分析仪光谱范围达到 1550~1890 nm,分辨率优于 4.8 nm,波长准确性±1.1 nm,信噪比 1202:1;利用该光谱分析仪对 0# 柴油和水的吸光度进行了应用实验,结果充分证明该系统的实用化水平。

关键词 光谱学; 近红外光谱; 光谱分析仪; 平场; 全息凹面光栅; Zemax 软件

中图分类号 TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.063002

Design and Performance Test of Practical Near Infrared Micro-Spectrometer

He Wenxin^{1,2}, Wen Zhiyu^{1,2}, Zhou Ying^{1,2}

¹Key Laboratory of Fundamental Science of Micro/Nano-Device and System Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China;

²Microsystem Research Center, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract In recent years, near infrared (NIR) spectroscopic analysis has attracted wide attention and it has been researched deeply as an important method of the identification of oil components in the process of petroleum exploration. The environmental conditions in the process of petroleum exploration are severe because of high temperature and cramped space in reservoirs. In view of the above technical problems, this paper develops a practical NIR micro-spectrometer with the volume of 154 mm×66.5 mm×38 mm, which can continuously and stably work in high temperature condition. The NIR micro-spectrometer selects concave grating as splitting element. The holographic concave grating with high throughput, few stray light and high quality imaging is designed by theoretical calculation and Zemax software simulation for characteristic band of oil gas. The detector adopts two stage semiconductor refrigeration linear charge-coupled device (CCD) of Hamamatsu. Through reasonable optical design and compact structure layout, it can stably work in high temperature condition of 70 °C. Then we calibrate and test performance of the spectrometer. The results show that spectral region of the NIR micro-spectrometer ranges from 1550 nm to 1890 nm, the resolution is better than 4.8 nm, the accuracy of wavelength is ±1.1 nm, and the signal-to-noise ratio is 1202:1. Finally, we conduct the application experiment of absorbance for 0# diesel oil and water, which fully demonstrates the practical level of the system.

Key words spectroscopy; near infrared spectroscopy; spectrometer; flat field; holographic concave grating; Zemax software

OCIS codes 300.6340; 050.1950; 120.6200

收稿日期: 2016-12-22; **收到修改稿日期:** 2017-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(仪器专项 61327002)

作者简介: 何文馨(1992—),女,硕士研究生,主要从事微型近红外光谱仪方面的研究。E-mail: hewenxin92@163.com

导师简介: 温志渝(1949—),男,教授,博士生导师,主要从事微型光谱仪和 MEMS 器件与系统方面的研究。

E-mail: zyw@cqu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

近红外光谱分析技术能够反映含氢基团(C—H, O—H, N—H 等)分子的倍频与合频吸收信息,且具有快速无损、便捷高效的特点,适合在线分析和过程分析,被广泛应用于环境监测、生物医疗、农业林业、军事分析、航空航天、石油化工等领域^[1-8]。近红外光谱分析仪正朝着小型化、便捷化、专用化的方向发展^[9-13]。在石油开采过程中,对井下地层流体成分实时分析和判断能够保证原油的高效开采,而近红外光谱分析法是该领域的常用分析方法。按照色散分光元件区分,微型近红外光谱仪可分为滤光片型、傅里叶变换(FT)型、声光可调(AOTF)型、光栅型和基于微机电系统(MEMS)技术等^[11]。目前,胜利油田和渤海区域油井测试应用的近红外光谱分析仪为滤光片型^[14],其具有大光能利用率、稳定可靠的优点,但由于滤光片数量有限,不能获得连续光谱,仅能反映简单样品的光谱信息;FT型近红外光谱分析仪便于实现宽谱段、高分辨率,但体积一般较大,对使用环境要求高,适合实验室使用;AOTF型近红外光谱分析仪精度高,稳定性好,但谱段窄,成本高昂;光栅型近红外光谱分析仪结构灵活,便于实现低成本制造和小型化^[15]。光栅型近红外光谱分析仪结构按光栅形貌可分为平面型、凹面型和凸面型。平面型以 Czerny-Turner(C-T)结构^[16]为代表,结构灵活且价格便宜,在成像面添加柱面镜可进一步消像散,也是目前商用微型光谱仪普遍采用的结构,但衍射效率普遍不高,光能利用率较低。凸面型光栅主要应用于 Schwarzschild 结构^[17]中,该类光栅简单紧凑,成像优质且易于微型化。凹面型光栅分为透射式^[18]和反射式,前者衍射效率更高。然而,凸面光栅和凹面透射式光栅的制作都比较困难。全息光学技术设计制造的变间距全息凹面光栅兼有分光与成像功能,结合线阵电荷耦合器件(CCD),构成只有一个光学作用面无可动部件的光谱分析系统,该系统具有高光能利用率、低杂散光、高稳定性的优点,能够弥补平面光栅衍射效率低的缺陷,且通过优化全息凹面光栅的制作参数和使用参数,能够实现特定波段像差校正,形成平直谱面共线阵 CCD 探测。

本文针对油气开采过程中的特定检测需求,分析原油的近红外光谱吸收峰特点,采用变间距全息凹面光栅作为核心光学元器件。通过理论计算初始结构,采用 Zemax 软件进行光学系统仿真优化;结合各部件实际尺寸和关键零件的调整需求,进行合理布局。考虑应用环境的特殊性,研制出一种能够在高温环境下(70 °C)稳定工作的实用化微型近红外光谱分析仪,并进行了相关性能测试和应用实验。

2 工作原理及设计

2.1 系统原理与组成

实用化微型近红外光谱分析仪主要包括:光学系统、探测器、信号采集与处理模块、数据传输模块。系统原理如图 1 所示,光源发出的复合光经样品池透射后成为信号光,通过入射光纤进入光学系统,经全息凹面光栅分光后得到按不同波长依次排列的单色光,并在线阵 CCD 探测器所在面成像,探测器将光信号转换为电信号;信号采集与处理模块对探测器的输出信号进行采集、预处理、放大后得到相应的光谱数据信息;数据传输模块通过通信接口(USB, RS485)将光谱信息传输到计算机,通过光谱处理软件的分析,即可获得被测样品的组分与含量信息,达到定性定量分析样品的目的。一般地,USB 接口用于数据快速传输场合,如仪器调试、实验室建模等;RS485 接口用于数据长距离传输,如远距离现场检测、井下检测等。

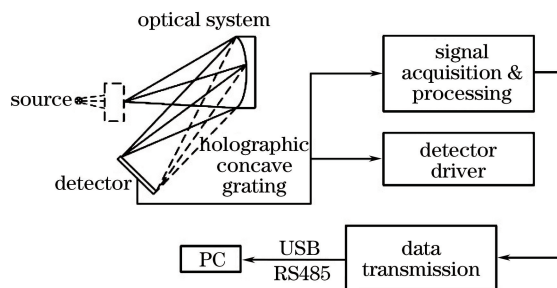


图 1 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of system

2.2 光学系统设计与仿真

光学系统是光谱分析仪的前端核心部分,其成像质量直接决定光谱分析仪的优劣。微型光栅光谱分析仪最常用的光学结构是基于平面光栅的 C-T 结构和以罗兰圆结构为基础的平场全息凹面光栅结构。前者结构紧凑,成本低,但涉及的光学零部件多,装调困难;后者的凹面光栅兼有分光 and 成像作用,构成只有一个光学作用面的光学系统,但也存在光谱范围小等不足。本研究选择凹面光栅结构作为光谱分析仪的前端光学系统,分析油气特征波段 1600~1850 nm 应用的工作环境(55 °C 稳定工作,70 °C 不损坏)及体积要求。初始结构的光谱波段确定为 1550~1900 nm,分辨率优于 5 nm,参照前期一些机构已做过的相关理论研究和结构计算方法。首先以罗兰圆为初始结构,然后逐步过渡到平场。根据凹面光栅上任意一点的光程函数的级数展开^[19]表示为:

$$W = F_{00} + yF_{10} + \frac{1}{2}y^2F_{20} + \frac{1}{2}z^2F_{02} + \frac{1}{2}y^3F_{30} + \frac{1}{2}yz^2F_{12} + \dots, \quad (1)$$

式中 y, z 对应光瞳函数, F_{ij} 为像差系数,不同序号 (i, j) 代表不同类型的像差^[20],可表示为:

$$F_{ij} = M_{ij} + (m\lambda/\lambda_0) H_{ij}, \quad (2)$$

式中 λ 为光栅的使用波长, λ_0 为制作波长, m 代表衍射级次, M_{ij} 对应光栅的使用参数, H_{ij} 对应光栅的制作参数。理想成像系统的光程函数应该与光瞳函数无关,但实际系统都存在像差,只能尽量减小与之相关参量的绝对值,或使其相互抵消。 F_{ij} 与 M_{ij} 和 H_{ij} 有关,即全息凹面光栅的使用参数和制作参数。因此平场全息凹面光栅的优化目标是让与光瞳函数 y, z 有关的变量 F_{ij} 的绝对值最小,即在光谱使用范围内 $\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$,使像差系数 F_{ij}^2 的积分值^[21-22]最小,可以表示为:

$$F_{ij}^2 = \int_{\beta_{\lambda_{\min}}}^{\beta_{\lambda_{\max}}} [F_{ij}(\alpha, \beta, r_A, r_B, \delta, \gamma, r_C, r_D, R)]^2 d\beta, \quad (3)$$

式中 α, β, r_A, r_B 为使用参数,分别表示入射角、衍射角、入射臂、出射臂; δ, γ, r_C, r_D 为制作参数,分别表示记录光源的空间位置; R 为凹面光栅的曲率半径。代入不同波长,即可计算得到光学系统初始结构的入射臂、出射臂、中心线对数、相干光源的坐标点。初步确定光路结构后,进一步考虑像差和杂散光,将边界条件以宏函数写入 Zemax 中,先以点光源入射代入进行仿真优化,达标后加入入射狭缝继续优化,直至全波段像斑满足要求,得到如图 2 所示的结构,右下角为点光源入射和狭缝入射的点列图。考虑到项目尺寸要求,取 -1 级衍射谱,前三行为点光源入射像斑,取全波段 1590~1860 nm 的两端和中间,分别为 1590 nm 与 1595 nm, 1725 nm 与 1730 nm, 1855 nm 与 1860 nm 作为参考,像斑两两均能分离,可见分辨率能够优于 5 nm;第 4 行为 1725 nm 与 1730 nm 处狭缝像的点列图,能够完全分离。最终得到制作点光源坐标分别为 $(0, 0, -300.0)$ 、 $(0, -45.6, -380.1)$,记录波长为 325 nm,其余各参量如表 1 所示。

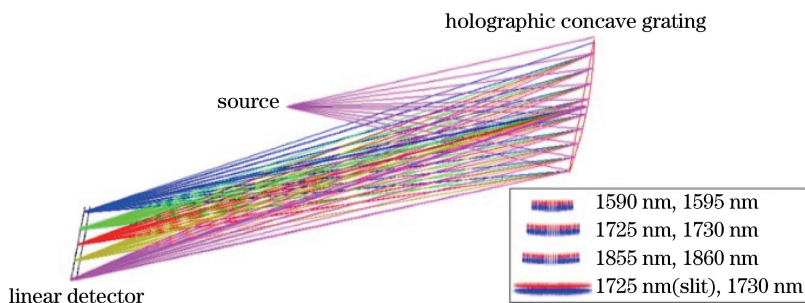


图 2 平场全息凹面光栅仿真结果

Fig. 2 Simulation results of the flat field holographic concave grating

表 1 平场全息凹面光栅参数表

Table 1 Parameters of the flat field holographic concave grating

Item	Parameter	Item	Parameter
Curvature radius /mm	69	Centralline /(g/mm)	367
Incident-arm /mm	60	Exit-arm /mm	94.5
Wavelength /nm	1590-1860	Resolution/nm	≤5

在保证系统良好散热与抗电磁干扰的基础上,考虑杂散光的影响,合理布局光学零部件、采集卡、探测器、制冷模块和外部接口,如图3所示。设计的零部件必须保证光学系统零部件的相对位置精确,设计的机械结构便于加工,装调方便可靠。光栅和探测器连接件必须具有三维调节功能,带底镂空基座选用铝合金,通过黑色硬质阳极氧化的表面处理工艺,既兼顾了系统内表面防反射的要求,又提高了外壳的强度和抗腐蚀性能。光谱分析仪的整体尺寸为 $154\text{ mm} \times 66.5\text{ mm} \times 38\text{ mm}$ 。

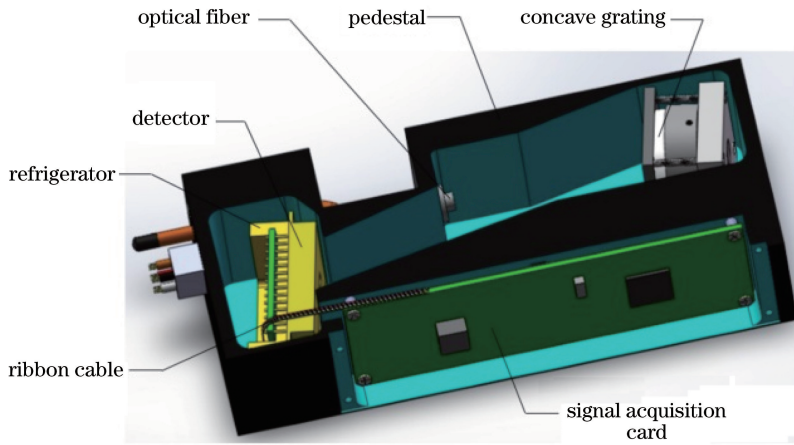


图3 光谱分析仪系统元件布局

Fig. 3 System component layout of the spectrometer

3 性能测试与分析

光源采用自制卤钨灯,可覆盖近红外全波段并在所需波段具有较大光强度。标定的标准物质选用4片进口窄带滤光片。分光系统结合设计指标,入射狭缝与光传输选用纤径为 $50\ \mu\text{m}$ 的 SMA905 光纤,设计制作平场全息凹面光栅作为分光成像器件。综合考虑光谱范围、分辨率和工作环境等因素,选用 Hamamatsu 公司带二级半导体制冷的 InGaAs G9206-256W 作为本光谱分析仪的线阵探测器,结合自主研发的专用集成采集卡构成下位机系统,完成探测器驱动、制冷模块和信号处理等。使用自主研发的光谱分析软件 SpectraAnalyze 完成下位机与上位机通信和光谱重构与显示。

3.1 标定及分辨率测试

为确定近红外线阵探测器的像元序号与光谱波长的对应关系,需要进行光谱标定。光谱分析仪的工作波段($1550\sim 1890\text{ nm}$)没有合适的标准线谱光源,因此标准物质选用4片中心波长分别为 $1647.4, 1707.0, 1761.5, 1823.0\text{ nm}$ 的窄带滤光片。利用标准物质测试得到波长与像元序号的4对对应关系,拟合三阶方程,得到标定曲线如图4(a)所示,标定方程系数将作为身份信息写入光谱分析仪系统,在每次使用时读取,用于重建光谱曲线。

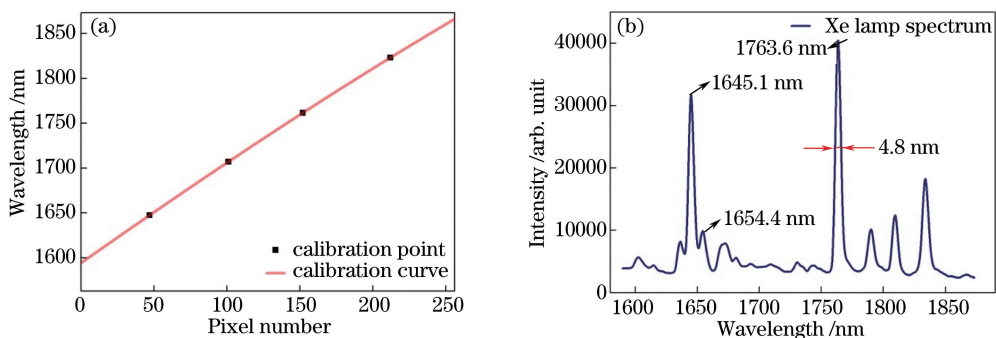


图4 系统(a)标定和(b)分辨率测试曲线

Fig. 4 (a) Calibration and (b) resolution test curves of the system

分辨率测试采用半峰全宽检测法^[23],在室温(25 °C)环境下,光谱分析仪以氙灯光源入射,设置积分时间为 6.0 ms,线阵探测器控温 0 °C,采集得到的光谱曲线如图 4(b)所示,在光谱分析软件 Spectra Analyze 中读取 1763.6 nm 处的半峰全宽(1766.0 nm—1761.2 nm=4.8 nm),并将 1645.1 nm 与 1654.4 nm 之差的一半 4.65 nm 作为分辨率的参考。结果表明本光谱分析仪的分辨率优于 4.8 nm,能够满足石油油藏井下流体识别的要求。

3.2 波长准确性与重复性

波长准确性与重复性是光谱分析仪的重要性能指标。采用中心波长为 1823.0 nm 的窄带滤光片作为标准物质,常温常压下进行测试。打开光谱仪,待其稳定工作后,将滤光片置于样品池处,读出峰值处的波长值;然后将滤光片取出后再放入,如此重复三次,读出三次峰值处波长值均为 1824.1 nm。所以,本光谱仪在 1823.0 nm 处的波长准确度为 ±1.1 nm。由于不存在可动部件,波长重复性为 100%,具有较高的稳定性。

3.3 信噪比

信噪比反映的是:在强光照射下,光谱分析仪接近饱和时信号的抖动,通常用该处的平均值与标准差的比进行衡量。采用卤钨灯照明,调节积分时间至光谱响应为最大,选取最大光强 99% 左右的像元点 1605.0 nm 处,以 10 ms/次的频率采样 1000 次。计算采样值的均值 \bar{x} 和标准差 σ 可以表示为:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}, \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}, \quad (5)$$

则信噪比 R_{SN} 计算如下

$$R_{SN} = \frac{\bar{x}}{\sigma} = 1202 : 1, \quad (6)$$

即本光谱分析仪的信噪比为 1202:1。

3.4 温度特性

油藏井下温度环境十分恶劣,采用辅助降温设备后最低只能保证 50 °C,一般光谱分析仪器不能在高温环境下稳定工作。为了验证本光谱分析仪能够适用于高温环境,进行了从 20 °C~70 °C,温差间隔为 5 °C 的连续温度实验。将光谱分析仪置于恒温鼓风干燥箱中,数字温度计置于光谱分析仪上方实时监测温度变化,以卤钨灯照明,并把中心波长为 1707.0 nm 的干涉滤光片置于样品池处,待光谱分析仪表面温度稳定后,上电工作。在 20~50 °C 时,积分时间取 10.5 ms,一次平均,平滑度取 3,线阵探测器控温 10.4 °C。环境温度稳定后,每个温度点的光谱数据采集三次取平均作为该温度点的光谱数据,中心波长为 1707.0 nm 的干涉滤光片的光谱特征曲线如图 5(a)所示,将滤光片每个温度点的峰值光强响应提取出来,绘制散点图如图 5(b)所示。

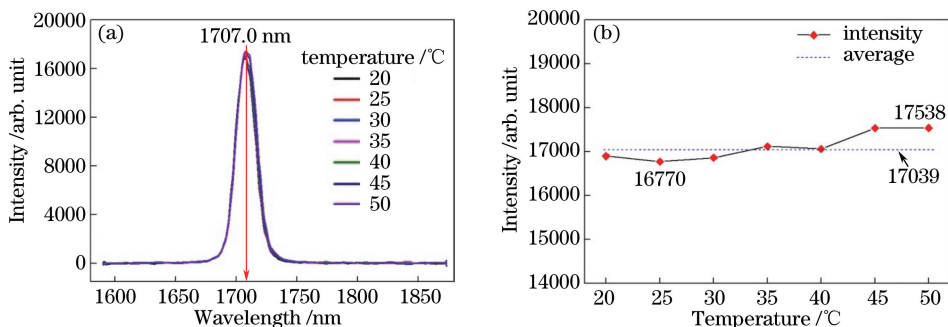


图 5 1707.0 nm 滤光片 20~50 °C 的温度曲线。(a) 光谱特征曲线;(b) 峰值响应散点图

Fig. 5 Temperature curves of 1707.0 nm filter at 20~50 °C. (a) Curve of spectrum profile; (b) scatter plot of peak response

由于温控制冷系统最大温差值为 40 °C,所以 50~70 °C 的线阵探测器控温 20.4 °C,积分时间取 7.2 ms,一次平均,平滑度取 5。环境温度稳定后,采集每个温度点的光谱数据,得到干涉滤光片光谱特征曲线如图 6(a)所示,相应的峰值光强如图 6(b)所示。

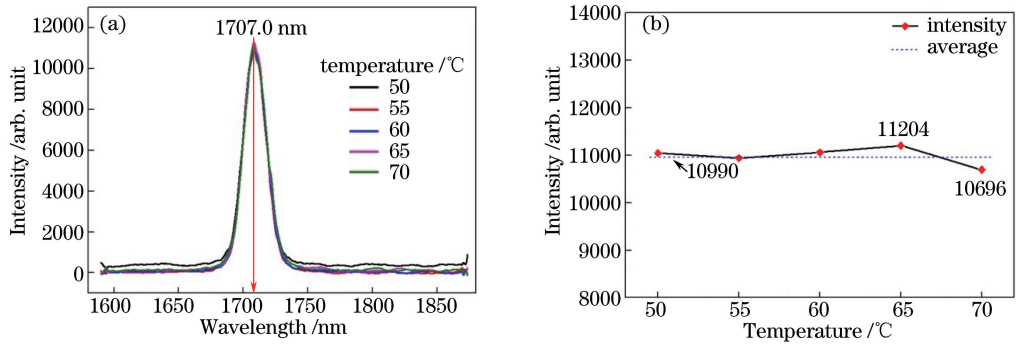


图 6 1707.0 nm 滤光片 50~70 °C 温度特性。(a)光谱特征曲线;(b)峰值响应散点图

Fig. 6 Temperature profile of 1707.0 nm filter at 50~70 °C. (a) Curve of spectrum profile; (b) scatter plot of peak response

由图 5、6 实验数据可得,研制的近红外光谱分析仪在 20~70 °C 的连续温度实验中,波长准确性达到 100%,各温度点的光谱特征线的重复性好,被测窄带滤光片的峰值强度响应的波动幅度小于 5%,线阵探测器在控温温度较低时有更好的性能表现。

3.5 应用实验

为了验证所设计的光谱分析仪可以用于石油开采过程中原油组分分析,采用 0# 柴油来近似原油,进行应用实验。用不同光程的石英比色皿(1,2,3,5,10 mm)进行了 0# 柴油光谱测试。光谱分析仪上电,温度控制稳定后,将 0# 柴油装入不同光程的比色皿中,依次置于样品池处,以卤钨灯照明,光源以平行光入射至比色皿,透射光经聚焦后进入分光系统,经平场全息凹面光栅分光后的-1 级衍射成像于线阵 InGaAs 探测器处,经信号预处理,模拟/数字(A/D)转换后,经 USB 接口传入计算机中,经 Spectra Analyze 软件处理并显示波长-吸光度曲线,如图 7(a)所示。

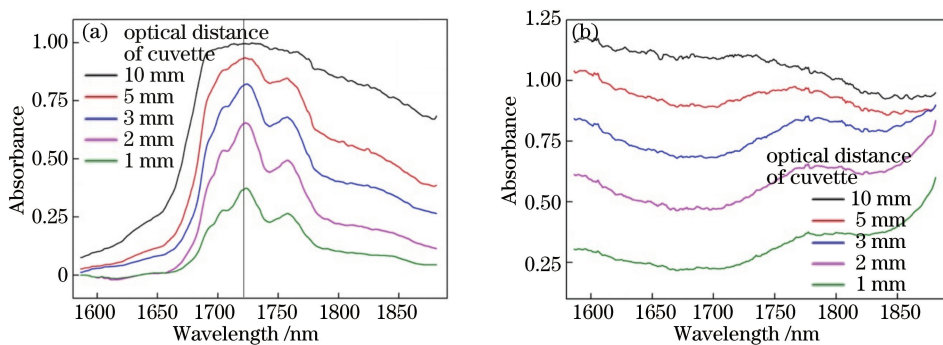


图 7 (a) 0# 柴油和(b)水不同光程吸光度曲线

Fig. 7 Absorbance curves of (a) 0# diesel and (b) water with different optical distances

由于水在近红外波段有较强的吸收作用,也测试了水的波长吸光度曲线,如图 7(b)所示。0# 柴油光谱的吸收峰位于 1720 nm,吸光度曲线从上到下分别为 10,5,3,2,1 mm 的光程。本光谱分析仪测得的水与柴油光谱图与文献中水和柴油光谱图^[14]具有相同的吸收峰和特征趋势,由于采用的分光系统与探测器不同,吸光度值存在差异。不同光程的比色皿光谱特征峰相同,吸光度不同。根据朗伯比尔定律,吸光度与摩尔吸收系数、液体浓度和光程成倍数关系。在摩尔吸收系数、液体浓度不变的情况下,吸光度与光程成正比,光程越大吸光度越大。图 7 所示 0# 柴油和水的吸光度曲线,在光程为 1~3 mm 变化时,吸光度随着光程的增加而增加,特征峰也更加明显。在光程为 5,10 mm 时,吸光度曲线出现饱和和削顶,尤其是光程为 10 mm 时,0# 柴油特征峰已经消失。这是由于光程过大,出现对光的吸收太多以致探测器无法检测的现象。对比可知,若采用本光谱分析仪进行油品分析,样品池光程设计为 2~3 mm 比较合适。

4 结 论

微型近红外光谱分析仪是电缆地层井下流体识别光学流体分析仪的技术核心,本文研制的基于平场全

息凹面光栅的实用化微型近红外光谱分析仪能够准确可靠地采集 1550~1890 nm 波段的连续光谱,且分辨率优于 4.8 nm。该光谱分析仪的指标达到国内实用化微型近红外光谱仪先进水平,能够为石油油藏井下流体分析提供了更丰富全面的信息。应用实验表明,结合化学计量学知识,本光谱分析仪能够进行石油原油的定性定量分析。在温度特性方面,能够保证 55 ℃ 环境下,稳定工作 4 h;环境温度为 70 ℃ 时,稳定工作 2 h。研究结果为后续光谱分析建模提供了重要的硬件支持。

致谢 感谢刘念慈老师和洪明坚老师在系统设计装调和软件调试中的帮助,感谢杜晓晴老师提供的设备支持。

参 考 文 献

- [1] Zhou Q, Pang J, Ni K. A portable flat-field concave grating spectrometer with high resolution[C]. SPIE, 2014, 9271: 92711K.
- [2] Murchie S, Arvidson R, Bedini P, *et al.* Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(E5): 431-433.
- [3] Zimmer F, Grueger H, Heberer A, *et al.* Development of a NIR microspectrometer based on a MOEMS scanning grating[C]. SPIE, 2004, 5455: 9-18.
- [4] Xu Guangtong, Lu Wanzhen, Yuan Hongfu. Determination of aromatic hydrocarbons in diesel by near-infrared spectroscopy[J]. *Petrochemical Technology*, 1999, 28(4): 263-265.
徐广通, 陆婉珍, 袁洪福. 近红外光谱法测定柴油中的芳烃含量[J]. *石油化工*, 1999, 28(4): 263-265.
- [5] Chen Yanping, Li Chunbin, Wang Xiaoling, *et al.* Detection of knee osteoarthritis with near infrared spectroscopy in vivo[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014(5): 1023-1026.
陈延平, 李纯彬, 王晓玲, 等. 膝骨性关节炎的在体近红外光谱检测[J]. *光电子 • 激光*, 2014(5): 1023-1026.
- [6] Otto T, Saupe R, Bruch R. Principle and applications of a new MOEMS spectrometer[C]. SPIE, 2006, 6114: 77-86.
- [7] Ding Haiquan, Lu Qipeng, Chen Xingdan. Effect of variable optical path length on the accuracy of the model in noninvasive biochemical detection by NIR spectrum[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0430003.
丁海泉, 卢启鹏, 陈星旦. 近红外光谱无创生化检测中不定光程对模型精度的影响研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0430003.
- [8] Zhang H, Song L, Wang H, *et al.* Study on the noninvasive blood glucose measurement by diffusion reflectance NIR spectroscopy[C]. SPIE, 2005, 5630: 460-467.
- [9] Lu Wanzhen, Chu Xiaoli. Near infrared spectroscopy and process analytical technology [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2007(4): 13-17.
陆婉珍, 褚小立. 近红外光谱(NIR)和过程分析技术(PAT)[J]. *现代科学仪器*, 2007(4): 13-17.
- [10] Ye Huajun, Liu Lipeng, Xia Alin, *et al.* Development and application of on-line near infrared spectroscopy analyzer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(3): 531-535.
叶华俊, 刘立鹏, 夏阿林, 等. 在线近红外光谱分析仪的研制及应用[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(3): 531-535.
- [11] Zhou Haibin, Lei Xinzhuo, Zhou Wang, *et al.* Overall design of miniature spectrometer based on Android[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 063001.
周海彬, 雷新卓, 周 望, 等. 基于 Android 系统的微型光谱仪总体设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(6): 063001.
- [12] Zhou Y, Wen Q, Wen Z, *et al.* Modeling of MOEMS electromagnetic scanning grating mirror for NIR microspectrometer[J]. *Aip Advances*, 2016, 6(2): 291-296.
- [13] Kraft M, Kenda A, Frank A, *et al.* Single-detector micro-electro-mechanical scanning grating spectrometer [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2006, 386(5): 1259-1266.
- [14] Kong Sun, Shen Yang, Zhang Xiaokang, *et al.* On line spectrum analysis technology for downhole mixed fluid[J]. *Welllogging Technology*, 2015, 39(4): 405-408.
孔 笋, 沈 阳, 张小康, 等. 井下混合流体光谱在线分析技术研究[J]. *测井技术*, 2015, 39(4): 405-408.
- [15] Li Quanchen, Jiang Yuejuan. The principle of spectrometer[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999: 18-27.

- 李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999: 18-27.
- [16] Tang Yi, Zheng Cheng, Nan Yibing, *et al.* Study of anamorphose correction of astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 0112007.
唐 义, 郑 成, 南一冰, 等. 消像散型 Czerny-Turner 成像光谱仪图像变形校正研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(1): 0112007.
- [17] Wang Baohua, Ruan Ningjuan, Guo Chongling, *et al.* Optical system design of airborne light and compact high resolution imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022001.
王保华, 阮宁娟, 郭崇岭, 等. 机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(10): 1022001.
- [18] Ren Zhong, Liu Guodong, Huang Zhen. Aspectrometer splitting-light system based on volume phase holographic transmission grating[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(6): 0608004.
任 重, 刘国栋, 黄 振. 一种体相位全息透射式光栅的光谱仪分光系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0608004.
- [19] Namioka T, Seya M, Noda H. Design and performance of holographic concave gratings[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1976, 15(7): 2039-1197.
- [20] Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao, *et al.* Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0205001.
孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0205001.
- [21] Noda H, Namioka T, Seya M. Geometric theory of the grating[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64(8): 1031-1036.
- [22] George N, Matthews J W. Holographic diffraction gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 1966, 9(5): 212-215.
- [23] Zhu Shaoji. Diffraction grating[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1986: 351-355.
祝绍箕. 衍射光栅[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 351-355.