

512×2元InGaAs光谱传感物联网节点研制

柯鹏瑜^{1,2,3}, 刘梦璇^{1,2,3,4}, 王绪泉^{1,2,3}, 黄松垒^{1,2*}, 张永刚^{1,2}, 方家熊^{1,2*}

1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 上海科技大学, 上海 201210)

摘要: 基于512×2元InGaAs光谱组件研制一款新型光谱传感物联网节点。针对中心距为25 μm的双列小像元探测器结构,在信号处理电路中对双通道数据进行均值处理,减小了单个光敏元响应异常对系统测试结果带来的影响。实验结果表明,此节点的测试波长范围为976~1700 nm,光谱分辨率达到13.5 nm,波长准确性优于3.2 nm,波长重复性优于0.3 nm,动态范围达到2300:1,吸光度重复性0.0011 AU,光源基线稳定性优于0.0001 A/h。采用多种标称酒精浓度的酒类样本对此光谱传感节点进行测试,验证其功能。

关键词: 短波红外; 光谱节点; 分光滤光片; InGaAs探测器

中图分类号: TN216

文献标识码: A

Development of 512 × 2-element InGaAs spectral sensor IoT node

KE Peng-Yu^{1,2,3}, LIU Meng-Xuan^{1,2,3,4}, WANG Xu-Quan^{1,2,3}, HUANG Song-Lei^{1,2*}, ZHANG Yong-Gang^{1,2}, FANG Jia-Xiong^{1,2*}

1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: Based on a 512 × 2-element InGaAs spectrum module, a new spectral-sensing IoT node is developed. The detector uses two parallel column structure with 25 μm pixel pitch. In order to reduce the impact on an abnormal response to a single pixel, the data onto two channels is averaged in the circuit. The experimental results show that the test wavelength range of this node is 976~1700 nm, and the spectral resolution is 13.5 nm. The wavelength accuracy is better than 3.2 nm, and the wavelength repeatability is better than 0.3 nm. The dynamic range is 2300:1, and the absorbance repeatability is 0.0011 AU. The baseline stability of light source is better than 0.0001 A/h. The function of the sensor node was verified by using alcoholic beverages samples of different nominal concentrations.

Key words: short-wave infrared, spectral-node, LVF, InGaAs detector

收稿日期: 2020-10-27, 修回日期: 2021-01-01

Received date: 2020-10-27, Revised date: 2021-01-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62075229), 安徽省科技重大专项(S202003a06020001), 传感技术联合国家重点实验室开放课题(SKT1907), 红外物理国家重点实验室开放课题(M201901)。

Foundation items: Supported by The General Program of National Natural Science Foundation of China (62075229), Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of Anhui Province (s202003a06020001), Open project of State Key Laboratories of Transducer Technology (SKT1907), and the Open project of State Key Laboratory of Infrared Physics (M201901)

作者简介(Biography): 柯鹏瑜(1995—), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 主要研究领域为光传感器应用技术. E-mail: kepengyu@mail.sitp.ac.cn
通讯作者(Corresponding author): E-mail: huangsl@mail.sitp.ac.cn, jxfang@mail.sitp.ac.cn

引言

近红外光谱检测技术是一种快速无损的检测方法,能进行定性和定量分析,适合在线实时检测,已在众多领域得到应用。传统的近红外检测技术使用的探测器大多为Si探测器,波段覆盖可见到近红外(0.7~1.1 μm),短波红外光谱(1.1~3 μm)检测由于其独特优势,近年来在农业、食品安全、制药等领域越来越受重视^[1]。使用 InGaAs 探测器,结合 MEMS 光栅、线性渐变滤光片(LVF)、声光可调滤波器(AOTF)等,进行便携式或微型短波红外光谱仪的研制或配套系统的开发与应用越来越多^[2-3]。在众多的微型化方案中,线性渐变滤光片型光谱仪与传统的光栅扫描型相比,没有移动部件,结构紧凑,在满足微型化需求的同时,其光谱分辨率适中,能满足近红外光谱检测的一般要求^[4-5],而近年来出现的基于分光滤光片的微型 InGaAs 光谱组件^[6-7],有助于进一步微型化设计。

本文基于一款使用分光滤光片的微型光谱组件,进行光谱传感物联网节点的研制与性能分析。组件内部使用 25 μm 像元中心距,512×2 元线列 InGaAs 探测器。对于滤光片型光谱仪来说,入射光路不准直会造成谱线平移,滤光片与探测器间的间隙

会引入光串扰^[8]。同时随着使用探测器像元间距的减小,光串扰和电串扰也会增加^[9],探测器本身的光响应不一致性也会造成数据的波动^[10]。在设计的过程中,为保证光路准直,将样本及光学器件放置在设计好的测试附件上,各测试附件放置在共轴的轨道上,同时滤光片尽可能贴近探测器表面,并在滤光片前增加光阑来抑制杂散光。通过双通道数据的均值处理,在一定程度上弥补了单线列像元响应的不一致以及异常响应带来的数据波动。实验结果表明,测试系统具有较好的光源稳定性,光谱节点在保证信噪比的同时具有体积小、重量轻的优点,在光谱分辨率、波长准确性和重复性上满足便携式近红外光谱设备检测的要求,具有进一步微型化和网络化的应用潜力。

1 光谱节点测试系统介绍

光谱节点测试系统如图 1,主要包括光源、光路准直模块、光谱组件、电子学模块、上位机软件五个部分。其中光谱组件是由光阑、900~1700 nm 波段的线性渐变滤光片、512×2 元线列 InGaAs 探测器构成,电子学模块主要包括探测器驱动电路、光谱数据采集电路、控制模块等。实验过程中,带有样本

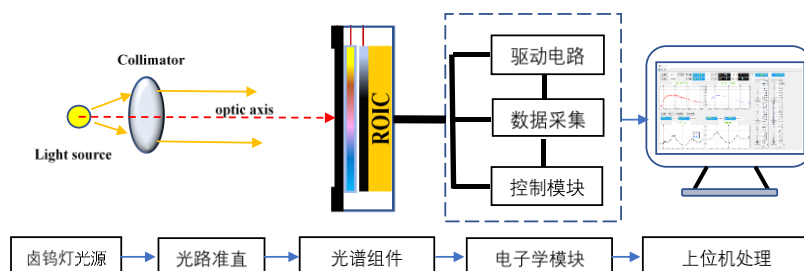


图 1 光谱节点测试系统示意图

Fig. 1 Diagram of spectral node test system

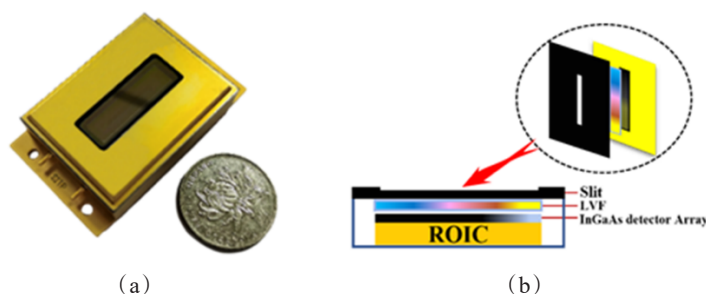


图 2 512×2 InGaAs 光谱组件 (a)实物图 (b)内部结构图

Fig. 2 512×2 InGaAs Spectral sensor: (a) The image of spectral sensor (b) Spectral sensor architecture

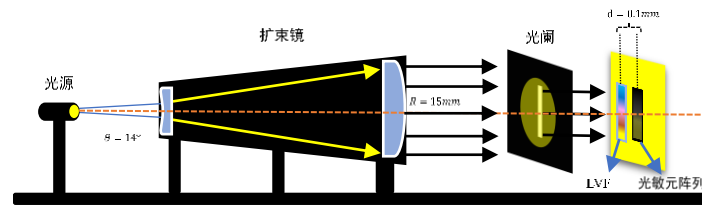


图3 实验光路示意图

Fig. 3 Schematic of the optical configurations

信息的光经光路准直后,由光谱组件完成分光及光电转换,电子学模块完成探测器的驱动以及数据采集和传输,最后通过电脑上位机软件完成光谱数据的存储和解析。

2 光学系统设计

512×2 InGaAs 光谱组件(图2(a))使用金属管壳真空封装,可以最大程度地减少外界温湿度变化对探测器造成的影响,其内部结构示意图如图2(b)。

对于线性渐变滤光片型光谱仪来说,光路设计主要考虑的因素有:1)入射平行光角度;2)光束发散角;3)杂散光抑制。

入射平行光的角度变化会引起中心波长向短波方向移动,相对移动量的估算公式为:

$$\Delta g = \frac{\Delta \lambda}{\lambda_0} = \frac{\theta^2}{2n^{*2}}, \quad (1)$$

其中 θ 为真空入射的光束入射角, n^* 为有效折射率。同时较大的光束发散角也会引起半峰宽的增加以及峰值透射率的下降,滤光片和探测器的装配间隙则会引入杂散光以及带来谱线展宽的影响^[11],所以在实验过程需要严格控制光路的准直以及对杂散光进行抑制。光源出光孔径为7 mm,光束发散角约为 14° ,光束发散角在 5° 以内对半高宽及峰值透射率的影响较小^[11],滤光片尺寸为15 mm(L)×5 mm(W),控制出射光斑尺寸与之相匹配。

整个实验光路如图3,所有元件放置在共轴轨道上,调整元件高度使得光轴通过各元件中心。为了满足光路准直与光斑大小的要求,使用Thorlabs公司的15倍可调扩束镜对光路进行准直和扩束,光束发散角控制在几个mrad以内,光斑直径约为30 mm。同时在线性渐变滤光片(LVF)前添加光阑以抑制入射杂散光的影响。滤光片在装配过程中与光敏元阵列对齐,两者间隙 d 控制在约0.1 mm,以减少谱线展宽和杂散光的影响。

3 电子学系统设计

3.1 系统整体结构

电子学系统设计包括以下几个部分:探测器驱动时序部分、探测器输出信号调理及采集部分、数据缓存及发送部分、上位机数据处理部分,整个系统的数据采集与处理过程如图4所示。

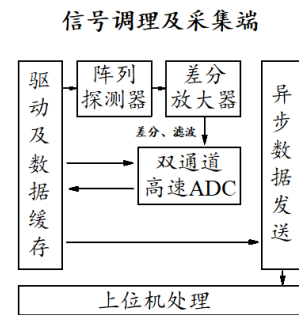


图4 信号采集过程示意图

Fig. 4 Schematic of the signal acquisition process

驱动时序的产生和数据缓存使用FPGA来完成,异步数据发送使用STM32F7系列芯片完成,信号调理通过差分放大器进行差分放大及滤波,最后通过14 bit双通道高速ADC来完成数据采集任务。

3.2 组件驱动电路设计

探测器供电电源为3.3 V,电源纹波要求小于10 mV,同时需要提供2.3 V的参考电压 V_{REF} 和2.4 V的偏置电压 V_{BOP} ,参考及偏置电压的纹波要求 $< 0.3\text{ mV}$,因此由高精度低温漂REF5025基准源芯片通过电阻分压加二阶低通滤波来产生,以此满足低纹波、低噪声的要求。

探测器的驱动时序如图5所示。使用FPGA来产生6路驱动时序,精确控制各路时序上升沿的到来时刻,其中探测器时钟设置为1 MHz,复位由RESET信号控制,积分时间为SH1与SH2下降沿之差,设置积分时间为2 ms,SH3控制积分模式,使用边积分边读出模式,ST信号后第一个CLK信号上升沿到

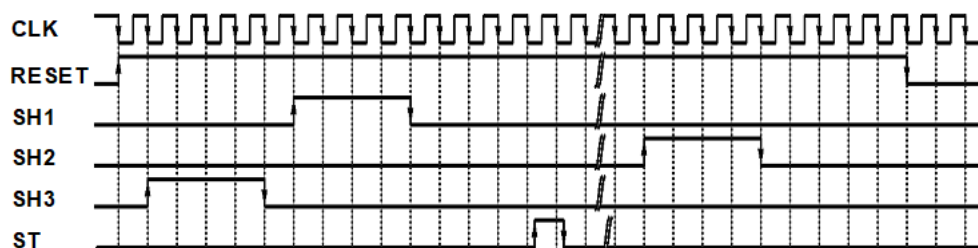


图5 SITP 512×2 InGaAs探测器驱动时序示意图

Fig. 5 Timing diagram of SITP 512×2 InGaAs detector

来时依次输出512个像元数据。使用相关双采样技术,每个通道的输出信号为一组差分信号 V_{OUTR} 与 V_{OUTS} , V_{OUTR} 在光照下基本不变, V_{OUTS} 随光强下降,实际像元的光响应为 $V_{OUTR}-V_{OUTS}$,差分输出能够有效抑制共模噪声,提高输出信号的信噪比,输出信号的饱和值为1.56 V,1 MHz时钟下信号压摆率约为12.6 V/ μ s。

3.3 组件输出信号调理和采集

为满足探测器差分输出信号的带宽与压摆率等要求,使用OPA2350单电源轨至轨低噪声小型运放进行差分输出,运放输出使用单位增益,在反馈端添加反馈电容 C_f 进行相位补偿和滤波。差分输出的信号由14 bit双通道高速ADC(20MSPS)AD9248进行采样,采样后缓存进FPGA进行平均处理,再通过STM32异步发送到电脑上位机进行数据处理。AD9248具有优异的信噪比和抗串扰度,内部自带基准源,异步数据通过50 kHz异步时钟发送到上位机,数据帧率为50帧/s。

4 实验与分析

4.1 实验平台设计

为验证光谱节点性能搭建的实验平台如图6所示,使用10 W的卤钨灯作为光源,光源外围带散热设计并附有透射样本槽,将其固定在可调高的升降台中心,升降台与轨道平行,调整升降台高度使光源出光孔与扩束镜中心对准,出光孔径为7 mm。

标准稀土氧化物玻璃测试实验中使用卤钨灯光源通过标准物后,经毛玻璃均光后通过扩束镜到达探测器表面;激光器输出响应实验中,激光器输出通过光纤与扩束镜耦合后到达探测器表面。为表征此光谱节点的基本性能,验证测试中透射样本使用1 mm光程的石英比色皿,放置在卤钨灯光源的透射样本槽内,透射光采用扩束镜输入的方式,在暗室中采集光谱数据。实际节点可通过集成光学附件与微型卤钨灯光源,采用紧凑的漫反射测量方



图6 实验平台示意图:1.光源,2.透射样本槽,3.标准稀土氧化物玻璃,4.扩束镜,5.光谱节点

Fig. 6 Schematic of the experimental platform: 1. Light source, 2. Transmission sample tank, 3. SRM2035a standard reference material, 4. Beam expander, 5. Spectral node

式,无需暗室。

4.2 分辨率

使用波长约1650 nm带TE控温的单模DFB激光器作为标定源,其输出线宽小于1 nm。激光输出通过单模光纤耦合进扩束镜到达探测器表面,其输出响应如图7所示,采用洛伦兹拟合得到其中心波长为1649.3 nm,测得半高宽为13.5 nm。线性渐变滤光片中心波长处半高宽沿长波方向增大,据此可得出此光谱节点的光谱分辨率优于15 nm,满足近红外光谱仪的一般要求^[12]。对于图7中1625 nm附近的响应小峰则是由于探测器光响应的非均匀性造成,而对于滤光片边缘处即靠近1700 nm时透射率逐渐减小并且线性度较好,所以影响较小。

4.3 基线(100%T)稳定性

在吸光度0 AU条件下,测试基线稳定性为0.00011 A/h。具体测量方法:不带样本,空白对空白(100%T)条件下,采集光源响应信号,在1 h内保持光源稳定输出,开启光源,待光源稳定后采集第一组数据作为参比信号,然后进行相关测试。

后三组数据与第一组数据比较计算得到吸光度,最后计算三组吸光度的RMS值得到基线稳定值^[12],如图8是测量的三组基线。通常近红外光谱仪的基线漂移指标满足0.0003 A/h^[12],光谱节点测试系统光源稳定性满足近红外光谱测试要求。

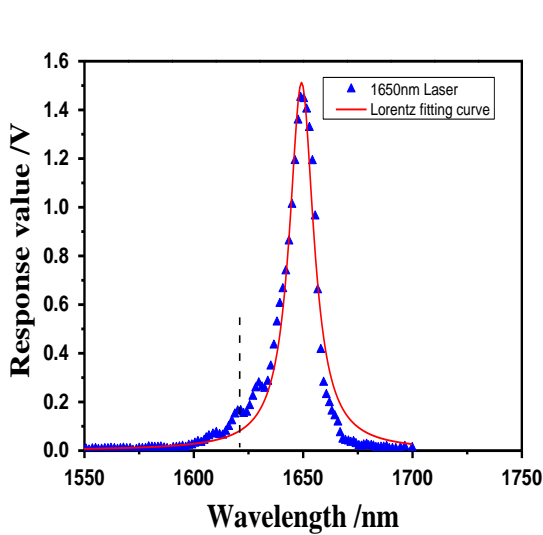


图7 光谱节点对 1650 nm DFB 激光器的响应特性
Fig. 7 Spectral-node response characteristics of the 1650 nm DFB laser

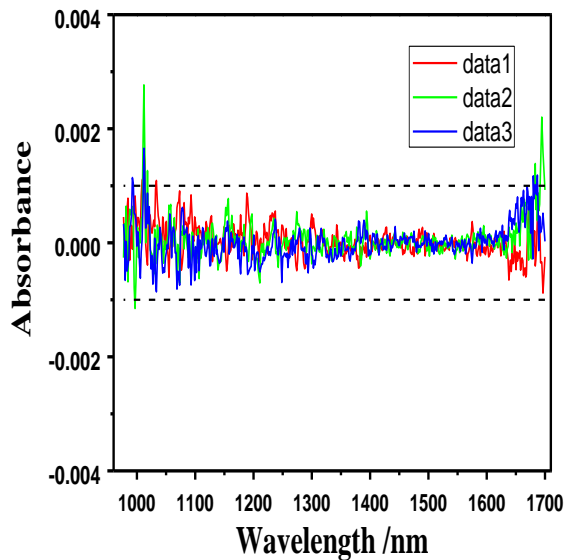


图8 光源基线稳定性测试结果
Fig. 8 Baseline stability test results of light source

4.4 动态范围

信噪比是近红外光谱仪器性能好坏的一项重要指标,对于便携式的设备来说,信噪比有时比分辨率更加重要^[12],信噪比的好坏会直接影响算法模型的精度^[13]。

$$DR = \frac{V_{sat}}{V_N}, \quad (2)$$

$$\overline{V}_N = \frac{1}{M-h} \sum V_{N,eff}(i), \quad (3)$$

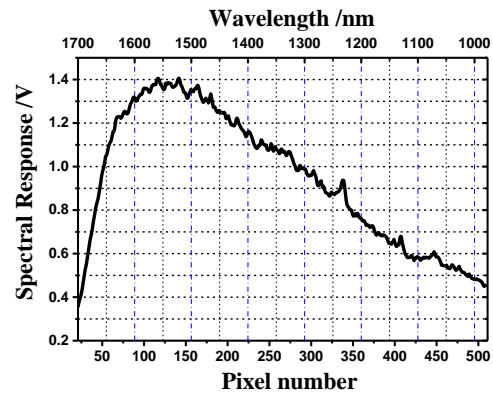


图9 像元及相关波长光谱响应曲线
Fig. 9 Spectral response curves of pixels and related wavelengths

$$V_N(i) = \frac{1}{K} \sqrt{\frac{1}{F-1} \sum_{f=1}^F \{ \overline{V}_{DS}(i) - V_{DS}(i,f) \}^2}. \quad (4)$$

信噪比使用式(2)动态范围公式来进行评估,式中 $V_N(i)$ 为像元噪声,由像元输出信号电压 $V_{DS}(i)$ 涨落的均方根值来估计, F 为采样帧数, K 为系统增益,该系统中 $K=1$, \overline{V}_N 为平均噪声电压, M 为像元总数, h 为过热像元数(像元噪声电压大于平均噪声电压 4 倍),双通道均不存在过热像元, $V_{N,eff}$ 为有效像元的噪声电压, DR 为动态范围,与光强及探测器灵敏度相关, V_{sat} 为饱和信号电压。在 2s 内不放置样品采集 100 帧光谱信号,计算得到节点的整体动态范围约为 2300:1(67dB)。

像元及其对应相关波长的光谱响应曲线如图 9,沿滤光片线性渐变方向,每 100 个像元对应 150 nm 波长范围,可以看出所使用的分光滤光片具有较好的均匀性。

4.5 波长准确性和重复性

波长准确性通过标准稀土氧化物玻璃 SRM2035a 来进行测试。实验中,光源稳定后每隔 5 分钟测一组数据,得到五组吸光度曲线,计算波长准确性是求其吸收峰处平均值与标准值之差,波长重复性为连续测量中最大值和最小值之差^[14],波长准确性和重复性值如表 1 所示。

波长准确性和重复性对矫正模型的建立和传递均有很大影响,从实验结果来看,节点的波长重复性较好。根据像元定标结果,像元间的波长间隔约为 2~3 nm,加上滤光片本身分辨率的限制,造成不同峰间的波长准确性差异,但整体的波长准确性和重复性能够满足便携式光谱设备应用的一般需求。

表1 节点波长准确性与重复性

Table 1 Wavelength accuracy and repeatability test of SRM2035a

Standard wavelength /nm	1075.6 ±0.1	1151.5 ±0.1	1222.2 ±0.2	1366.8 ±0.1	1469.1 ±0.2
Test1	1074.9	1151.0	1218.9	1366.3	1466.7
Test2	1074.9	1151.0	1219.0	1366.3	1466.7
Test3	1074.8	1151.0	1219.0	1366.2	1466.7
Test4	1075.0	1150.7	1219.1	1366.3	1466.7
Test5	1074.9	1150.7	1219.0	1366.1	1466.6
Accuracy	-0.7	-0.7	-3.2	-0.6	-2.4
Repeatability	0.2	0.3	0.2	0.2	0.1

4.6 吸光度重复性

吸光度重复性对近红外检测是一个极其重要的指标,它直接影响建立的模型质量和测量的准确性。我们使用测得的SRM2035a的5组吸光度数据进行计算,得到此光谱节点的吸光度重复性为0.0011 AU。

4.7 样本实验

利用测试平台对4种不同标称酒精浓度的酒类样本进行测试。吸光度由式(5)计算,其中 V_{ref} 为参考信号, V_{sig} 为实际样本信号。实验过程中使用1 mm光程的石英比色皿,以放置空比色皿时的透射信号作为参比信号,计算得到无水乙醇和水的吸光

度曲线,对于不同标称浓度的酒类样本,则以无水乙醇的透射信号作为其参比信号,计算得到其吸光度曲线。实测参比后的不同酒类样本的吸光度曲线结果如图10,作为参比的无水乙醇及纯水的吸光度曲线如图10插图。可以看出,在1.35~1.55 μm 波长范围内水的吸收峰很明显,吸收波长峰值约为1.45 μm ,不同酒类样本的吸光度差异可以用于鉴别酒类样本的酒精浓度。

$$A = -\log_{10} \left(\frac{V_{sig}}{V_{ref}} \right) \quad (5)$$

5 结论

本文所研制的新型光谱传感物联网节点在整体性能上满足便携式近红外光谱检测设备的要求,实验平台具有较好的光源稳定性和光路准直性,通过对标准物质的测试结果表明,节点具有较好的波长重复性,但由于所使用的分光滤光片本身分辨率的限制,不同波长的准确性存在一定差异。对于25 μm 像元中心距512×2线列InGaAs探测器,双通道数据的均值处理,在一定程度上减小了单通道部分像元响应异常以及像元间响应不一致带来的影响,后期需要对像元的响应非均匀性做进一步校正,同时进一步提高节点系统的信噪比。在后续应用中,进一步减小节点体积并通过无线通信的方式,将512×2节点采集到的样本数据发送到PC端或者手机端,开展相应的物联网应用实验。

References

- [1] ZHANG Jian, CUI Ji-Cheng, LIU Xiao-Mei, et al. The technology of short-wave infrared imaging spectroscopy applied to detecting wheat scab [J]. *Optical Technique* (张健, 崔继承, 刘晓梅, 等. 短波红外成像光谱技术在小麦赤霉病检测中的应用. *光学技术*), 2019, **45** (5): 553-556.
- [2] LIU Jian-Xue, YIN Xiao-Hui, HAN Si-Hai, et al. Review of portable near-infrared spectrometers [J]. *Journal of Henan Agricultural University* (刘建学, 尹晓慧, 韩四海, 等. 便携式近红外光谱仪研究进展. *河南农业大学学报*), 2019, **53** (4): 663-666.
- [3] GUO Zhi-Ming, CHEN Quan-Sheng, ZHANG Bin, et al. Design and experiment of handheld near-infrared spectrometer for determination of fruit and vegetable quality [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (*Transactions of the CSAE*) (郭志明, 陈全胜, 张彬, 等. 果蔬品质手持式近红外光谱检测系统设计与试验. *农业工程学报*), 2017, **33** (8): 245-250.
- [4] NADA A. O'Brien, CHARLES A. Hulsea, DONALD M. Friedrich, et al. Miniature Near-Infrared (NIR) Spectrometer Engine For Handheld Applications [J]. *Proc. SPIE 8374, Next-Generation Spectroscopic Technologies V*,

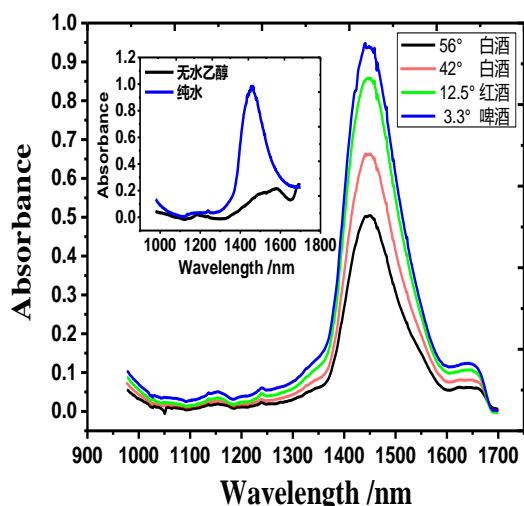


图10 实测不同标称浓度酒类吸光度曲线,插图为作为参比的无水乙醇及纯水的吸光度曲线: The illustration shows the absorbance curve of absolute ethanol and pure water as reference
Fig. 10 The absorbance curves of alcoholic beverages with different nominal concentrations were measured,

- 837404 (2012).
- [5] WU Jing-Zhu, LIU Cui-Ling, XING Su-Xia, *et al.* Analysis of the influence of spectral resolution on the performance of near infrared model of edible oil [J]. *Journal of Beijing University of technology and Technology (NATURAL SCIENCE EDITION)* (吴静珠,刘翠玲,邢素霞,等.光谱分辨率的选取对食用油近红外模型性能影响分析.北京工商大学学报(自然科学版)), 2012, **30** (1): 68.
- [6] WEI Yang, WANG Xu-Quan, WEI Yong-Chang, *et al.* Application research of sensor digitization for compact near infrared IOT Node [J]. *Infrared and Laser Engineering* (魏杨,王绪泉,魏永畅,等.微型近红外物联网节点的传感器输出数字化应用研究.红外与激光工程), 2019, **48** (09): 31-36.
- [7] WANG Xu-Quan, HUANG Song-Lei, YU Yue-Hua, *et al.* A compact long-wavelength near-infrared IOT node and its performance experiments [J]. *J. Infrared Millim Waves* (王绪泉,黄松垒,于月华,等.微型长波近红外物联网节点及实验研究.红外与毫米波学报), 2018, **37** (01): 42-46.
- [8] INGMAR G. E. Renhorn, DAVID Bergström, JULIA Hedborg, *et al.* High spatial resolution hyperspectral camera based on a linear variable filter, [J]. *Opt. Eng.* 2016, **55** (11): 114105
- [9] LONG Wan, WANG Rui, XU Zhong-Jie. Research Status and Development of Crosstalk in the Infrared Imaging Systems [J]. *Laser & Optoelectronics Progress* (龙弯,王睿,许中杰.红外成像系统中串扰效应的研究现状与进展.激光与光电子学进展), 2015, **52** (10): 32-39.
- [10] LI Xue, SHAO Xiu-Mei, LI Tao, *et al.* Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering* (李雪,邵秀梅,李陶,等.短波红外InGaAs焦平面探测器研究进展.红外与激光工程), 2020, **49** (01): 64-71.
- [11] YU Xin-Yang. Linear gradient filter type near infrared fruit quality analyzer and its application research [D]. Doctor thesis. University of Chinese Academy of Sciences (于新洋.线性渐变滤光片型近红外水果品质分析仪及应用研究.中国科学院大学博士论文), 2016: 35-72.
- [12] TIAN Gao-You, CHU Xiao-Li, YUAN Hong-Fu, *et al.* The main specifications of near infrared spectroscope and their evaluation methods [J]. *Modern Scientific Instruments* (田高友,褚小立,袁洪福,等.近红外光谱仪器主要技术指标与评价方法概述.现代科学仪器), 2005, (4): 17-20.
- [13] ZHUANG Xin-Gang, SHI Xue-Shun, Liu Hong-Bo, *et al.* The influence of signal-to-noise ratio of spectrometer on the precision of near infrared spectroscopy [J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2020, **11** (03): 211-21.
- [14] SHI Man-Man, HUANG Mei-Zhen. Development of a small fast scanning near infrared spectrometer [J]. *Acta PHOTONICA Sinica* (施嫚嫚,黄梅珍.小型快速扫描近红外光谱仪的研制.光子学报), 2011, **40** (04): 591-595