

Research on Miniaturization of LAPS Detection System Based on DSP and Mobile Phone Terminal

Lei Liu¹, Rong Zhang¹, Zhenwu Gong², Qingjie Fan², Yunfang Jia^{1*}

¹College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin

²Lanlike Chemical Electronic High Tech Co. LTD., Tianjin

Email: *jiayf@nankai.edu.cn

Received: Mar. 23rd, 2020; accepted: Apr. 8th, 2020; published: Apr. 15th, 2020

Abstract

Detection systems based on advanced technology platforms such as digital signal processing (DSP) chips and mobile phone terminals are the current developing trend of electrochemical biochemical analysis systems. The light addressable potentiometric sensor (LAPS) detection system is exploited based on DSP and mobile phone terminal. The integrated functions including LAPS output signal acquisition and processing, light source modulation signal generation, and real-time display and storage of data are realized in the proposed DSP based LAPS system. The application of this DSP-LAPS system for measuring pH values of similar buffer solutions is conducted to verify the correctness and feasibility of this system.

Keywords

LAPS, DSP, Mobile Terminal, Digital Phase-Locked Processing

基于DSP与手机终端的LAPS检测系统小型化研究

刘磊¹, 张蓉¹, 龚振武², 范清杰², 贾芸芳^{1*}

¹南开大学电子信息与光学工程学院, 天津

²兰力科化学电子高技术有限公司, 天津

Email: *jiayf@nankai.edu.cn

收稿日期: 2020年3月23日; 录用日期: 2020年4月8日; 发布日期: 2020年4月15日

*通讯作者。

摘要

基于数字信号处理(DSP)芯片、手机终端等先进技术平台的检测系统是目前电化学生化分析系统的发展趋势。研制了基于DSP与手机终端的光寻址电位传感器(LAPS)检测系统,系统集成了LAPS输出信号采集与处理、光源调制信号产生和数据实时显示与保存等功能,实现了系统的小型化,并将其应用于不同pH的溶液中进行检测,验证了系统的正确性与可行性。

关键词

光寻址电位传感器, DSP, 手机终端, 数字锁相处理

Copyright © 2020 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

电化学生化分析系统是现代化学、生物、环境、医药等研究中的重要工具,传统的检测系统由于在小型化、智能化、现场检测等方面还有待提高,限制了生化分析技术的推广和应用。随着电子技术的飞速发展,利用数字信号处理(DSP)芯片、手机终端等先进技术平台,优化传统电化学检测系统,已成为现代生化检测仪器研究中的主要趋势之一,例如:周永军等人以 DSP 为主控芯片,搭建实时检测系统,实现了对牛奶含菌量的快速检测,且检测下限低至 10^3 [1]; Mohd Farhan Siddiqui 等人设计了基于手机终端控制的微型分析仪,为实现土壤中砷的现场检测,提供了简单、快速、便携的方法[2]; 李阳等人搭建了基于 DSP 和手机终端的无创血糖检测仪,该系统具有操作方便、检测迅速、人机交互性好等优点,系统对 64 组样本的血糖进行测试,其测试值与参考值的相关系数达到 0.863 [3]。由此可见,利用 DSP 和手机终端,研制便于携带、精度高、易于操作的现代生化分析系统,对满足食品、环境、医学等方面的快速检测需求具有重要的实际意义。

作为一种新型半导体光电生化分析器件,光寻址电位传感器(Light Addressable Potentiometric Sensor, LAPS)在免疫分析[4]、重金属检测[5]、电子鼻[6]等方面得到了广泛研究。其中,关于 LAPS 检测系统的研究主要为:李龙华等人将数字锁相放大器应用于 LAPS 输出信号的处理,提高了输出信号的信噪比[7]; 郭子瑜等人设计了基于 FPGA 的光源控制电路,成功实现了 LAPS 系统中光源阵列的寻址与调制等功能[8]; 邱恒明等人采用 LabVIEW 软件,搭建了 LAPS 检测系统的软件控制界面,实现了测试结果的实时显示[9]。但是,小型化 LAPS 检测系统的研究未见报道,为此本文首次提出将 DSP 与手机控制终端相结合,构建便携型 LAPS 检测系统的设计方案,并研制了样机(如图 1 所示),长、宽、高分别为 30 cm、25 cm、15 cm,核心控制单元的长宽仅为 10 cm × 10 cm,其中左侧为 LAPS 三电极单元、中部为基于 DSP 的 LAPS (LAPS-DSP)控制单元、右侧为电源。相比于传统的检测系统由不同设备组合而成,本文设计的检测系统使用 DSP 既作为控制核心又作为信号处理器,充分利用了 DSP 的资源,优化了系统结构,缩小了系统体积。本文设计的基于 DSP 和手机 APP 的检测系统,将为用户提供一种小型、便携的 LAPS 光电化学检测系统的设计方案,满足对参比电压、光源控制、数据实时采集与存储等多方面的要求,对推动光电化学型生化分析仪器的开发具有较好的实际意义。



Figure 1. Prototype photo

图 1. 样机照片

2. 主要功能的设计方案

基于 DSP 和手机终端的 LAPS 检测系统主要包括 LAPS 检测系统 APP、LAPS-DSP 控制单元、LAPS 检测终端三部分,如图 2 所示。其中,LAPS 检测系统 APP 是人与 LAPS 检测系统进行信息交互的界面,它与 LAPS-DSP 控制单元之间的通信方式为蓝牙;LAPS-DSP 控制单元将接收到的偏置电压、光源控制等控制参数,分别转换成控制信号,并发送给 LAPS 检测终端的恒电位仪和信号发生器;LAPS 检测终端以 LAPS 传感器(工作电极, WE)、参比电极(RE)、对电极(CE)为核心,其中施加给 RE 的参比电压(V_{RE})由恒电位仪控制,CE 和 WE 间的输出电流经 I/V 转换、放大、滤波、采样等电路的处理后,输入 LAPS-DSP 控制单元,被“数字锁相处理”后,由“蓝牙”发送至 LAPS 检测系统 APP 反馈给用户并将结果保存在手机中。其中,光源调制信号由信号发生器 AD9833 产生,经驱动电路处理后,控制光源的调制频率和强度。该系统应实现五项功能,即基于手机 APP 的人-机界面、 V_{RE} 控制、光源调控、LAPS 微弱信号的采集与调理,各项功能的设计如下文所述。

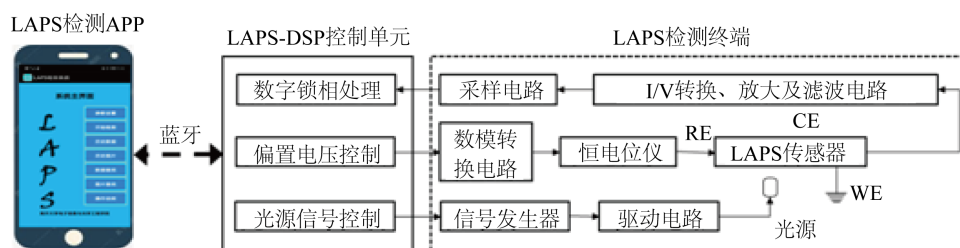


Figure 2. Overall structure diagram of LAPS detection system

图 2. LAPS 检测系统整体结构图

2.1. LAPS 检测系统 APP 的设计

LAPS 检测系统 APP 基于 Java 语言开发,主要由 4 个界面构成:(a) 参数设置界面主要实现通道选择、幅度选择、波形选择、频率选择以及偏压选择等功能;(b) 通信连接界面主要是搜索 LAPS-DSP 控制单元的蓝牙,建立通信连接,实现数据传输;(c) 实时数据界面控制检测的开始和停止,显示检测数据与图像;(d) 文件操作界面主要是对数据文件进行存储、查找、重命名等操作,具体设计如图 3 所示。基于手机终端开发的 LAPS 检测系统 APP 使检测系统脱离了电脑的控制,极大的缩小了设备体积,也有助于满足现场实时检测的需求。



Figure 3. LAPS detection system APP interface. (a) Parameter setting interface; (b) Communication connection interface; (c) Real-time data interface; (d) File operation interface

图 3. LAPS 检测系统 APP 界面。(a) 参数设置界面；(b) 通信连接界面；(c) 实时数据界面；(d) 文件操作界面

2.2. V_{RE} 控制

LAPS-DSP 控制单元通过数模转换器(DAC)将偏置电压的控制参数转换成模拟信号,该模拟信号通过恒电位仪施加到 RE 上。恒电位仪的作用是为了保持 RE 与 WE 之间电压恒定。本文设计的恒电位仪主要由电压跟随器(U9A 和 U10B)、低通滤波器(U9B)、控制运放(U10A)等部分组成,具体实现如图 4 所示。输入电压 V_i 作为 U9A 的同相输入, U9A 的输出为基准电位, U10B 的输出为 V_{RE} 。U10A 对输入电压 V_i 和 V_{RE} 进行负反馈调节,通过比较两个输入端的信号,使两个输入端信号的电压相等,从而达到保持 V_{RE} 恒定的目的。

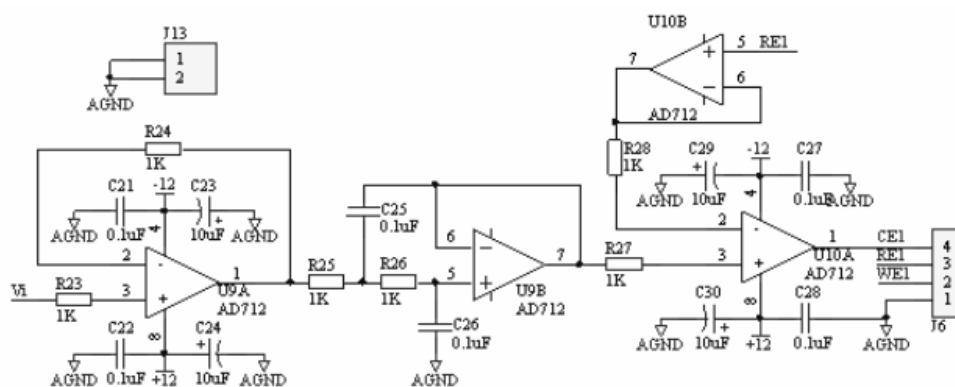


Figure 4. Potentiostat circuit

图 4. 恒电位仪电路

2.3. 光源调控

本文设计的检测系统采用 AD9833 产生光源调制信号,AD9833 可以产生正弦波、方波、三角波三种波形信号,输出信号的频率可以达到 12.5 MHz,可以满足检测系统对光源调制信号的设计需求。LAPS-DSP 控制单元首先初始化信号发生器 AD9833,然后从收到的数据包中解析出光源信号的控制信息

(频率、波形、幅度), 产生相应的控制字, 其中: 变量 *frequency* 表示实际频率值, 变量 *WAVE_MODE* 的 0、1、2 分别表示三角波、方波、正弦波, 最后 LAPS-DSP 控制单元每次向 AD9833 写入 16 位数据, AD9833 输出相应的波形。AD9833 的配置电路主要由 AD9833 芯片和晶振构成, 具体实现如图 5 所示。AD9833 (P1)的参考时钟(MCLK)由 25 MHz 有源晶振(P2)提供, 采用+5 V 直流供电。LAPS-DSP 控制单元通过 P4 接口与 AD9833 连接, 进而通过 FSYNC、SCLK、SDATA 三个引脚控制 AD9833。P3 的 S 引脚连接 AD9833 的 VOUT, 作为光源调制信号的输出端口。此外, 为了提高 AD9833 的输出信号对光源的驱动能力, 本文设计了由运算放大器 op27 构成的驱动电路, 为信号发生器产生的输出信号提供 2.5 V 的直流偏置, 保证光源的正常工作。

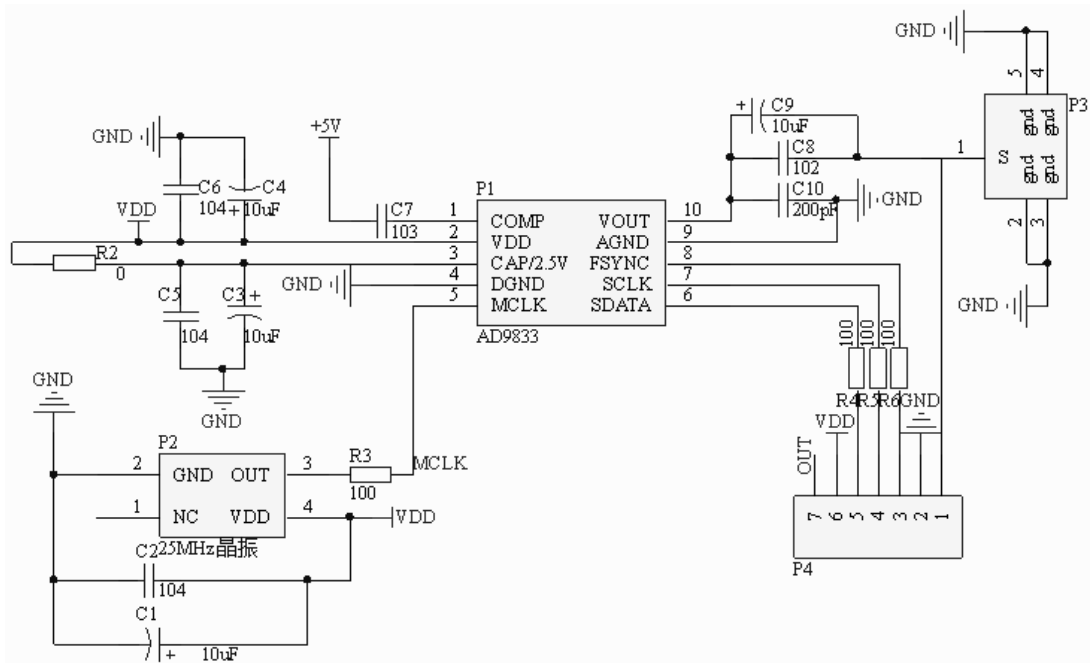


Figure 5. AD9833 pin connection diagram
图 5. AD9833 引脚连接图

2.4. LAPS 输出信号的采集与调理

LAPS 三电极检测单元的输出信号为 WE 和 CE 间的电流, 具有较低的信噪比。为提取其中的有效信号, 检测系统对原始信号先后进行了 I/V 转换、放大、低通滤波、采样、锁相放大等处理, 简述如下。首先, I/V 转换电路利用 AD712 将 LAPS 三电极检测单元的输出电流 I_{LAPS} 转换为输出电压 V_{LAPS} ; 然后, V_{LAPS} 通过反相放大器、20 KHz 低通滤波电路以及采样电路进行调理; 最后, 调理后的输出信号(V_{LAPS})输入 LAPS-DSP 控制单元中的数字锁相放大单元, 采用正交矢量型数字锁相算法[10]进行信号处理, 以去除其中的噪声等干扰信息。

数字锁相处理的数据处理流程如图 6 所示, 简要说明如下。待测信号(V_{LAPS})经模拟/数字转换(ADC)转换成 DSP 能操作的数字信息。数字化的 V_{LAPS} 分别与正弦参考信号和余弦参考信号(与光源调制信号同频)进行相关运算, 其操作流程为: 数字化的 V_{LAPS} 与两路参考信号相乘后的结果分别为 V_x 、 V_y ; V_x 、 V_y 分别进行傅里叶变换、低通滤波、傅里叶逆变换、均值滤波等操作。最后, 相关运算中的两路输出信号 (X、Y)经三角运算, 得到 V_{LAPS} 中有效信号的幅值 A 与相位 θ , 其中 A 是 LAPS 检测的目标。

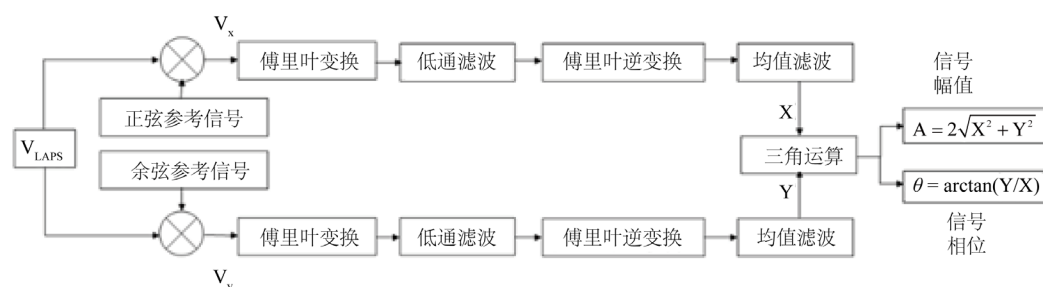


Figure 6. Digital phase-lock processing implementation flow
图 6. 数字锁相处理实现流程

3. 测试与分析

3.1. V_{RE} 稳定性测试

在 RE 与 WE 之间接上电阻, LAPS 检测系统 APP 设定不同的偏置电压, 测量 RE 与 WE 之间的偏置电压值(V_{RE}), 图 7 给出的是所接电阻为 1 K Ω (实测为 1.004 K Ω)时, V_{RE} 测量结果。分析可知, 当偏置电压小于 1000 mV 时, 绝对误差为 0, 当偏置电压大于等于 1000 mV 时, 绝对误差在 1 mV 左右, 结合实际应用情况, 该 V_{RE} 稳定性良好。

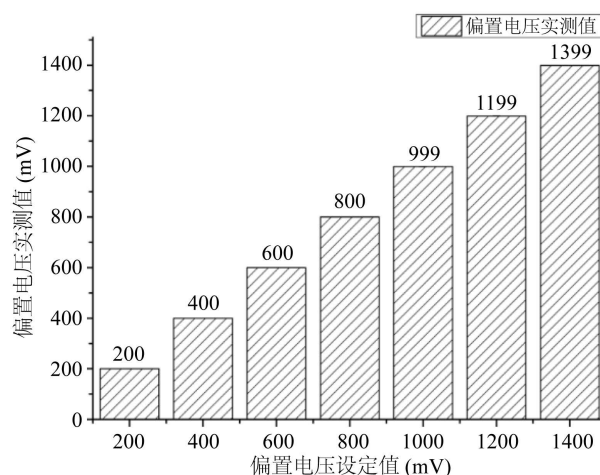


Figure 7. Measured result of bias voltage
图 7. 偏置电压实测结果

3.2. 光源信号测试结果

使用示波器测试光源调制信号, 图 8(a)给出的是信号波形为正弦波时, 信号频率的测试结果, 信号频率的绝对误差小于 6 Hz, 图 8(b)是示波器的波形显示结果, 图中波形完整且平滑, 以上说明本文设计的系统能产生有效的光源调制信号, 且信号频率范围广, 满足设计要求。

3.3. 不同 pH 溶液测试结果与分析

LAPS 与待测溶液接触的表面是 Si_3N_4 , 其对 H^+ 有较强的结合能力, 当溶液中 H^+ 的浓度改变时, LAPS 的输出信号也会随之变化。因此实验使用 pH 分别为 2、5、7.4、9、12 的五种溶液作为待测溶液, 通过测量回路的光生电流, 进行对比。

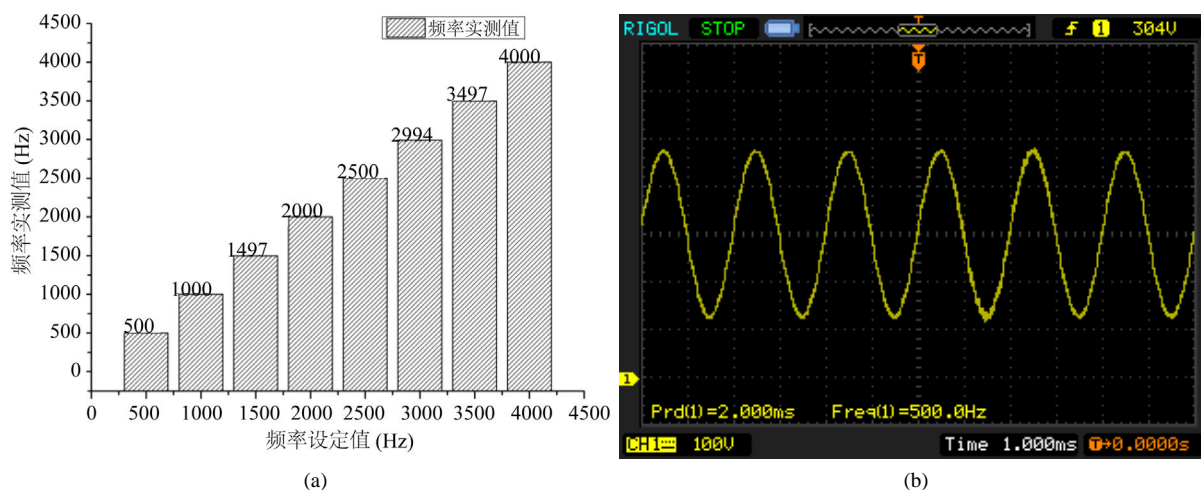


Figure 8. Light source modulation signal test results. (a) Signal frequency test results; (b) 500 Hz sine wave light source modulation signal

图 8. 光源调制信号测试结果。(a) 信号频率测试结果; (b) 500 Hz 的正弦波光源调制信号

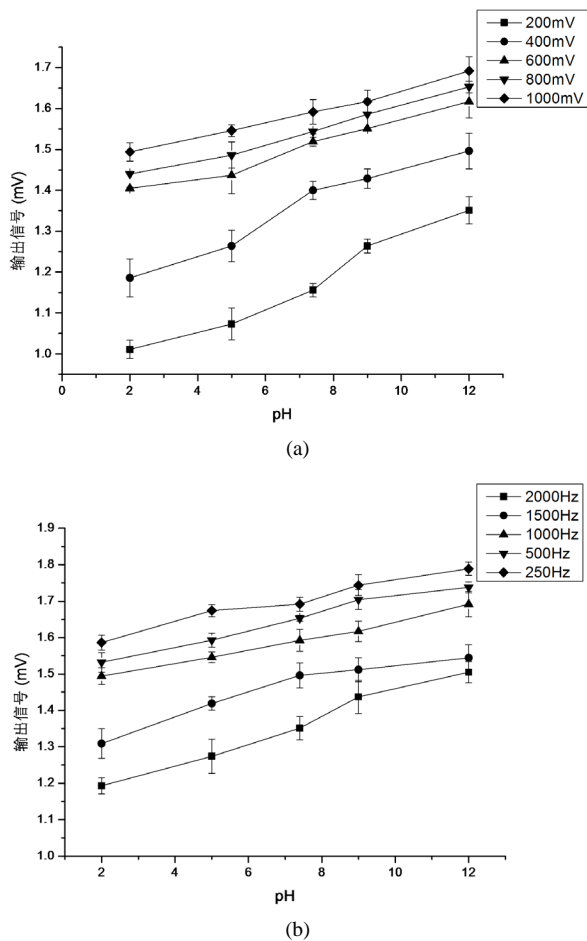


Figure 9. Test results of different pH solutions. (a) Change the bias voltage test result; (b) Change the light source modulation signal frequency test result

图 9. 不同 pH 溶液的检测结果。(a) 改变偏置压测试结果; (b) 改变光源调制信号频率测试结果

如图 9 表明, LAPS 的输出信号与溶液 pH 成良好的线性关系, 本文设计的系统能够有效的检测到溶液 H^+ 浓度的变化, 且数据曲线变化明显, 经过系统处理后的输出信号的响应幅度达到 mV 级别。系统在不同偏置电压和不同光源调制信号下的检测结果均具有良好的输出响应, 得出有效的检测数据, 证明了系统的可靠性。

4. 结论

本文借助 DSP 与手机终端将 V_{RE} 与光源调制信号的控制、LAPS 输出信号的采集与调理以及结果的实时显示等功能集成于一体, 实现了 LAPS 检测系统的小型化, 完成了对不同 pH 溶液的检测。该检测系统具有体积小、便于携带和操作灵活等优点, 满足了生化传感器对快速与现场实时检测的需求, 对生化传感器的现场应用具有较好的实际意义。

参考文献

- [1] 周永军, 牛中奇, 卢智远, 等. 基于电化学传感器的菌量实时检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2014(2): 83-84+98.
- [2] Mohd, S., Soocheol, K., Hyoil, J., *et al.* (2018) Miniaturized Sample Preparation and Rapid Detection of Arsenite in Contaminated Soil Using a Smartphone. *Sensors*, **18**, 777-789. <https://doi.org/10.3390/s18030777>
- [3] 李阳, 唐飞, 王晓浩, 等. 无创血糖检测仪的 DSP 和 Android 软件系统设计[J]. 传感技术学报, 2013(10): 1323-1327.
- [4] Gehring, A.G., Patterson, D.L. and Tu, S.I. (1998) Use of a Light-Addressable Potentiometric Sensor for the Detection of *Escherichia coli* O157:H7. *Analytical Biochemistry*, **258**, 293-298. <https://doi.org/10.1006/abio.1998.2597>
- [5] Lue, C.E., Lai, C.S., Chen, H.Y., *et al.* (2010) Light Addressable Potentiometric Sensor with Fluorine-Terminated Hafnium Oxide Layer for Sodium Detection. *Japanese Journal of Applied Physics*, **49**, 04DL05(1-4). <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.04DL05>
- [6] 潘跃峰, 吝涛, 付静, 等. 水污染动态实时监测的便携式电子舌分析仪[J]. 微纳电子技术, 2007, 44(Z1): 351-352.
- [7] 李龙华, 贾芸芳. 基于 DSP 的数字锁相放大器在 LAPS 检测系统中的应用[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2013(3): 95-100.
- [8] 郭子瑜, 任立儒, 王涛, 等. 光寻址电位传感器系统及其光源控制电路的设计[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2011(2): 3-7.
- [9] 邱恒明, 梁晋涛, 陈东, 等. 基于 LabVIEW 的光寻址电位传感器实时测试系统[J]. 仪表技术与传感器, 2016(10): 76-78.
- [10] 赵俊杰, 郝育闻, 郭璐璐, 等. 数字锁相放大器的实现研究[J]. 现代电子技术, 2012, 35(3): 191-195.