

引用格式: TONG Xing-yuan, YAN Xiao-guang, CHEN Dong. Orthogonal Phase Detection Method of Light-addressable Potentiometric Sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4):0423002

佟星元, 闫晓光, 陈东. 光寻址电位传感器的正交相位检波检测方法[J]. 光子学报, 2020, 49(4):0423002

光寻址电位传感器的正交相位检波检测方法

佟星元, 闫晓光, 陈东

(西安邮电大学 电子工程学院, 西安 710121)

摘 要:光寻址电位传感器的幅度检测方法易受噪声干扰, 灵敏度差, 信噪比和精度低, 且受调制光源的影响较大, 影响检测结果的准确性. 为此提出了一种基于正交相位检波的光寻址电位传感器检测方法. 该方法是将光寻址电位传感器的输出光电流信号分别与两路正交信号相乘, 通过低通滤波提取直流分量并相除, 即可得到光寻址电位传感器的输出信号相位信息. 与已有的光寻址电位传感器相位检测方法相比, 该方法具有算法复杂度低、实时性高的优点. 实验研究了调制光源光强对光寻址电位传感器幅度检测和相位检测的影响, 对比分析了光寻址电位传感器的传统幅度检测方法 with 正交相位检波检测方法对 pH 检测的灵敏度、线性度及信噪比. 结果表明, 相比于幅度检测方法, 调制光源光强对光寻址电位传感器的相位检测影响更小, 在频率为 10 kHz, pH 的范围为 1.68~10.01 的情况下, 相位检测方法比幅度检测方法测得的灵敏度增加了 7 mV/pH, 精度提高了 14.9 mpH, 非线性误差减小了 0.003%, 均方差减少了 0.1051×10^{-5} , 信噪比增加了 8.282 7 dB. 该方法特别适用于弱光下的光寻址电位传感器检测.

关键词:光寻址电位传感器; 正交检波; 相位检测; 灵敏度; 精度

中图分类号: TP212.3

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204904.0423002

Orthogonal Phase Detection Method of Light-addressable Potentiometric Sensor

TONG Xing-yuan, YAN Xiao-guang, CHEN Dong

(School of Electronics Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: The amplitude detection method of the Light-Addressable Potential Sensor (LAPS) is susceptible to noise interference, low sensitivity, low precision, low signal-to-noise ratio, and is greatly affected by the modulated light signal, which affects the accuracy of the detection results. Therefore, a LAPS detection method based on orthogonal phase detection is proposed. In this method, the LAPS photocurrent signal is multiplied by two orthogonal signals, and the direct current component is extracted by low-pass filters and divided, so that the phase information of LAPS photocurrent signal can be obtained. Compared with the existing LAPS phase detection method, the proposed method has the advantages of low algorithm complexity and high real-time performance. The influence of the modulated light intensity on the amplitude detection and phase detection of LAPS is studied. The sensitivity, linearity and signal-to-noise ratio of the conventional amplitude detection method and the orthogonal phase detection method of LAPS to the detection of pH are compared. The results show that, compared with the amplitude detection method, the modulated light intensity has less effect on the phase detection of LAPS. When the frequency at 10 kHz, the pH is from 1.68 to 10.01, the sensitivity of the phase detection method is increased by 7 mV/pH, the precision accuracy is increased by 14.9 mpH, the nonlinear error is reduced by 0.003%, the mean square error is reduced by 0.1051×10^{-5} , the signal-to-

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61674122), 陕西省自然科学基金(No. 2018JM6032), 陕西省教育厅科研专项计划项目(No. 17JK0694)

第一作者: 佟星元(1984—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为生物医疗电子、低功耗电路设计、光电信息检测等. Email: mayxt@126.com

通讯作者: 陈东(1978—), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为半导体生化传感器. Email: dchen@xupt.edu.cn

收稿日期: 2019-11-28; 录用日期: 2020-01-02

<http://www.photon.ac.cn>

noise ratio is increased by 8.2827. The proposed method is especially suitable for LAPS detection in weak modulated light intensity.

Key words: Light-addressable potentiometric sensor; Orthogonal phase detection; Phase detection; sensitivity; Precision

OCIS Codes: 230.3120; 120.1880; 120.0280; 140.2020; 280.1545

0 引言

20世纪80年代,光寻址电位传感器(Light-addressable Potentiometric Sensor, LAPS)被初次提出^[1]之后被应用到离子检测^[2-3]、细胞代谢活动检测^[4-5]、细菌生长检测^[6-7]及脱氧核糖核酸(Deoxyribonucleic Acid, DNA)检测^[8-9]等领域的研究中.作为半导体器件,LAPS具有响应速度快、灵敏度高、电位稳定性好^[10]的优点.不同于其他类型的传感器,LAPS是通过将调制光源从正面或背面照射不同的敏感区域,实现对不同敏感区域处溶液中特定物质浓度的检测,从而实现光寻址^[11].由于敏感膜的存在,被测溶液与敏感膜发生电化学反应,在敏感膜表面形成膜电位,使耗尽层的厚度发生变化,耗尽层厚度的变化和被测物质的浓度成正比,因此可以通过检测 LAPS 输出光电流信号的幅度或相位获取被测物质的浓度.目前,应用 LAPS 对溶液中特定物质浓度检测最主要的方法是提取其输出光电流信号的幅值^[12].但是当调制光源较弱时,检测到的 LAPS 响应信号十分微弱,且存在信号漂移和大量的噪声干扰,严重影响检测结果的可靠性^[13].而当使用相位检测的方法时,调制光源信号的波动及调制光源光强对 LAPS 输出的相位的影响较小^[14],提高了检测结果的可靠性和准确性.MIYAMOTO K 等曾提出过一种基于傅里叶级数展开的 LAPS 相位检测方法^[15],但该方法的算法复杂度高,实时性较差.将发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)阵列、液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)、有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)等阵列光源^[16-18]用于 LAPS 检测,可以使检测系统小型化,提高检测的实时性,但是阵列光源的光强较弱.

鉴于此,本文提出了基于正交相位检波的 LAPS 检测方法.相比于传统检测光电流幅值的方法,该方法最大的特点是对调制光源的光强不敏感,相比于基于傅里叶级数展开的 LAPS 相位检测方法,该方法最大的优点是减少了算法的复杂度,提高了检测实时性.通过实验研究,对比分析了传统幅值检测方法和正交相位检波检测方法,LAPS 对不同 pH 缓冲液检测的灵敏度、线性度、精度和去噪声能力.

1 正交相位检波检测方法的原理

1.1 LAPS 的电路模型

处于耗尽阶段的 LAPS 等效电路模型^[19-20]如图 1 所示, C_i 为绝缘层电容, R_e 为参比电极和溶液电阻的串联, C_d 为半导体耗尽层电容, I_{ph} 为耗尽层中产生的光电流信号, I_t 为设备检测到的回路电流.

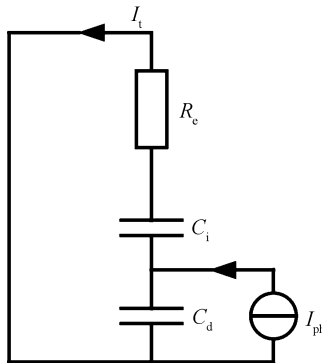


图 1 LAPS 电路模型
Fig.1 The circuit model of LAPS

计算得到 I_{ph} 与 I_t 之间的关系为

$$\frac{I_t}{I_{ph}} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_d} + \frac{1}{j\omega C_i} + R_e} \quad (1)$$

进一步推导得到 I_{ph} 与 I_t 之间的相位差 θ 为

$$\theta = -\arctan\left(\frac{R_e C_d C_i \omega}{C_d + C_i}\right) \quad (2)$$

式中, ω 为光源调制信号的角频率. 由于敏感膜表面存在一定的膜电位, 当溶液的 pH 不同时, 与敏感膜表面的反应程度也不同, 使得 LAPS 耗尽层的厚度不同, 从而影响半导体耗尽层电容 C_d 的大小. 由建模可知, 当 C_d 变化时, θ 也会发生变化, 因此, 可以通过检测 I_{ph} 与 I_t 之间的相位差得到被测溶液的 pH 值. 由式(1)、(2)可知, 与幅值检测的方法相比, I_t 与 I_{ph} 之间的相位差 θ 不直接受 I_{ph} 的影响, 从而调制光源信号的波动及调制光源光强对 LAPS 输出相位的影响较小, 提高了检测结果的可靠性和准确性.

1.2 傅里叶级数展开方法

基于傅里叶级数展开 LAPS 的相位检测方法的实现过程为将光电流信号和光源调制信号分别进行傅里叶级数展开, 并通过基波系数的等式关系进行计算.

将光电流信号和光源调制信号分别表示为

$$I_p(t) = A_p \sin(2\pi f_m t + \theta_p) \quad (3)$$

$$I_m(t) = A_m \sin(2\pi f_m t + \theta_m) \quad (4)$$

式中, f_m 为调制信号的频率, A_p 、 A_m 和 θ_p 、 θ_m 分别为光电流信号与光源调制信号的幅值和相位.

对式(3)进行傅里叶级数展开, 计算其基波系数, 并利用系数之间的关系得到

$$X_p = \frac{2}{T} \int_0^T I_p(t) \sin 2\pi f_m t dt = A_p \cos \theta_p \quad (5)$$

$$Y_p = \frac{2}{T} \int_0^T I_p(t) \cos 2\pi f_m t dt = A_p \sin \theta_p \quad (6)$$

式中, T 为周期, $T = 1/f_m$.

同理, 对式(4)进行傅里叶级数展开, 有

$$X_m = \frac{2}{T} \int_0^T I_m(t) \sin 2\pi f_m t dt = A_m \cos \theta_m \quad (7)$$

$$Y_m = \frac{2}{T} \int_0^T I_m(t) \cos 2\pi f_m t dt = A_m \sin \theta_m \quad (8)$$

通过式(5)~(8)可以计算得到 A_p 、 A_m 和 θ_p 、 θ_m , 其中

$$\theta_p = \tan^{-1}\left(\frac{Y_p}{X_p}\right) \quad (9)$$

$$\theta_m = \tan^{-1}\left(\frac{Y_m}{X_m}\right) \quad (10)$$

由式(9)、(10)可得到光电流信号与光源调制信号之间的相位差 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = \theta_m - \theta_p \quad (11)$$

可见, 傅里叶级数展开的算法存在多个积分运算和反正切运算, 算法的复杂度高, 产生运算误差, 实时性差.

1.3 正交相位检波方法

对于基于正交相位检波的 LAPS 检测方法, 参考信号 I_{ms} 及与其正交的信号 I_{mc} , 和 LAPS 输出的光电流信号 I_p 的表达式可以分别表示为

$$I_{ms} = A \sin(2\pi f_m t) \quad (12)$$

$$I_{mc} = B \cos(2\pi f_m t) \quad (13)$$

$$I_p = C \sin(2\pi f_m t + \varphi) \quad (14)$$

式中, A 、 B 分别为两路正交信号的幅值, C 为光电流信号的幅值, f_m 为光源调制信号的频率, 两路正交信号的频率需要与光源调制信号的频率相同, φ 为检测到的光电流信号 I_p 与参考信号 I_{ms} 之间的相位差.

根据三角公式可知

$$A \cos(2\pi f_m t) \cdot C \sin(2\pi f_m t + \varphi) = \frac{AC}{2} [\sin\varphi + \sin(4\pi f_m t + \varphi)] \quad (15)$$

$$B \sin(2\pi f_m t) \cdot C \sin(2\pi f_m t + \varphi) = \frac{BC}{2} [\cos\varphi - \cos(4\pi f_m t + \varphi)] \quad (16)$$

根据式(15)、(16)提取直流分量并相除,可得到光电流信号与参考信号之间的相位差正切值,即

$$\lambda \tan\varphi = \frac{A}{B} \cdot \frac{\sin\varphi}{\cos\varphi} \quad (17)$$

式中, $\lambda = A/B$. 最后将系数 λ 除去并进行反正切运算,即可得到光电流信号与参考信号之间相位差 φ . 通过两种方法的对比,可以看出采用正交相位检波的检测方法,可以优化算法实现的复杂度,提高 LAPS 检测的实时性.

2 正交相位检波检测方法的实现

2.1 基于正交相位检波的 LAPS 检测系统

LAPS 实时检测系统中的中心控制部分采用 SmaqUSB3112 数据采集卡,16-bit 模拟输入分辨率,最高支持 1 MS/s 采样率. LAPS 正交相位检波检测系统的总体框图如图 2 所示,数据采集卡的模拟输出 A_{out0} 为 LAPS 提供偏置电压,模拟输出 A_{out1} 和 A_{out2} 输出两路正交信号并通过模拟输入 A_{in1} 和 A_{in2} 进行采集,用于正交相位检波算法.光源驱动电路将模拟输出 A_{out3} 输出光源调制信号功率放大,为激光二极管提供足够的输出功率.检测到的微弱光电流信号通过跨阻放大电路放大 10^6 倍,并转换为可以识别的电压信号经模拟输入 A_{in1} 采集到数据采集卡.应用 LabVIEW 控制系统运行,把采集到的光电流信号进行带通滤波、正交检波算法,并在 LabVIEW 前面板中显示检测结果.

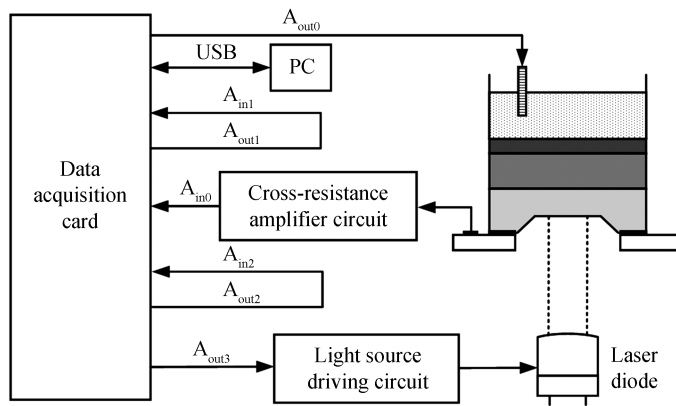


图 2 正交相位检波 LAPS 检测系统框图

Fig.2 The block diagram of LAPS orthogonal phase detection system

2.2 系统程序设计

正交相位检波算法的结构框图如图 3 所示,通过将两路正交信号分别与采集到的光电流信号进行相乘、低通滤波器滤除高频信号后相除,即可得到光电流信号与光源调制信号的相位差 φ 的正切值.应用这种方法进行相位检测,相比于傅里叶级数分解方法,不仅可以降低算法的复杂度,而且在其他可编程器件中也容易实现,还可以通过搭建电路的方法实现.

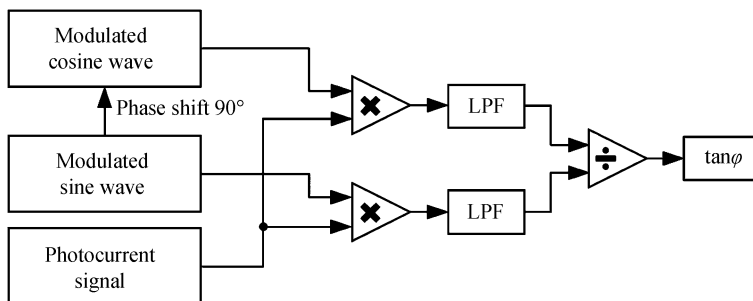


图 3 正交相位检波算法结构框图

Fig.3 The block diagram of the orthogonal phase detection

系统控制程序是整个正交相位检波 LAPS 检测系统的控制核心, 不论是对信号的控制还是对信号的处理都是由 LabVIEW 完成的. 系统控制程序主要起两方面的作用: 一方面是为 LAPS 提供必要的光源调制信号、偏置电压信号及用于正交相位检波算法的两路正交信号; 另一方面是对光电流信号及两路正交信号进行采集, 并对采集到的信号进行带通滤波, 正交相位检波算法和其它运算处理等.

LAPS 的实时检测过程如图 4 所示, 在程序运行前, 需要对光源调制信号和偏置电压的信息参数进行初始化设置. 光源调制信号需要设置的参数主要有: 信号类型、幅值、偏移量和初相位, 而对于偏置电压需要设置的参数为: 偏压初始值、偏压步进值、偏压最大值及步进间隔. 程序运行后, 首先对整个系统进行初始化, 输出调制正弦波及两路正交信号, 然后对光电流信号及两路正交信号进行数据采集、正弦相位检波运算, 自动地从偏压最小值到偏压最大值进行检测, 实时的生成 $P-V$ 特性曲线.

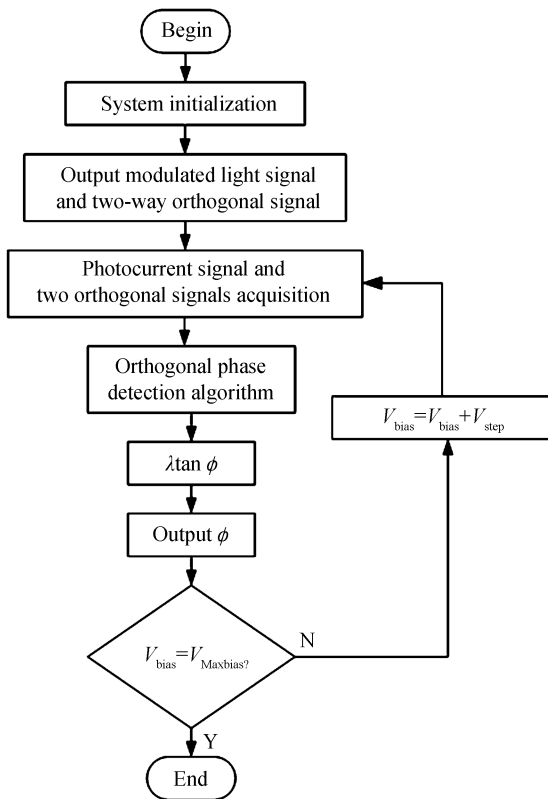


图 4 LAPS 检测流程
Fig.4 Flowchart of LAPS detection

3 测量实验与结果

采用 Si_3N_4 薄膜作为 H^+ 的敏感膜, 低压化学气相淀积 (Low Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD) 形成的 Si_3N_4 敏感膜密度高, 对 pH 有良好的响应性, 光源采用波长为 650 nm、额定光输出功率为 5 mW 的激光二极管, 参比电极选取甘汞电极, pH 缓冲液均为标准缓冲液, 其 pH 值分别为 1.68、4.01、6.86、7.00、9.18 和 10.01.

在幅值检测方法和正交相位检波检测方法下, 分别对 LAPS 的灵敏度和线性度进行测试, 并检测不同光照强度对 LAPS 幅值和相位的影响. 检测系统输出的光源调制信号为正弦波, 频率为 10 kHz, 偏移量为 3.5 V, 幅值为 1.5 V. 检测系统分别记录偏置电压从 -3 V 到 1 V、步进为 10 mV 情况下, 所对应的 LAPS 输出光电流信号的幅值和相位信息. 将检测到的 $I-V$ 特性曲线进行归一化后找到 dI/dV 最大的点, 即拐点, 是 LAPS 对溶液中 H^+ 浓度最敏感的点, 这里为归一化光电流为 $0.5 \mu\text{A}$ 的点. 同理, 在 $P-V$ 特性曲线中, 拐点为 dP/dV 最大的点, 即归一化后 ϕ 为 0.5° 的点.

LAPS 的 $I-V$ 特性曲线和 $P-V$ 特性曲线如图 5(a) 和 (b) 所示, 随着被测溶液 pH 的增大, 曲线水平向右移动, 不同的 pH 缓冲液在拐点处所对应的偏置电压不同. 幅值检测方法下, pH 与偏压的关系曲线如图 5(c)

所示,将 6 组数据通过最小二乘法进行直线拟合,拟合直线的斜率即为 LAPS 对 pH 的灵敏度,其值为 51.6 mV/pH,非线性误差为 0.015%。而在相位检测方法下,pH 与偏压的关系曲线如图 5(d)所示,测得灵敏度为 58.6 mV/pH,非线性误差为 0.012%。检测结果表明,相位模式更加适用于 LAPS 的检测,应用正交检波的方法进行 LAPS 检测提高了检测灵敏度。

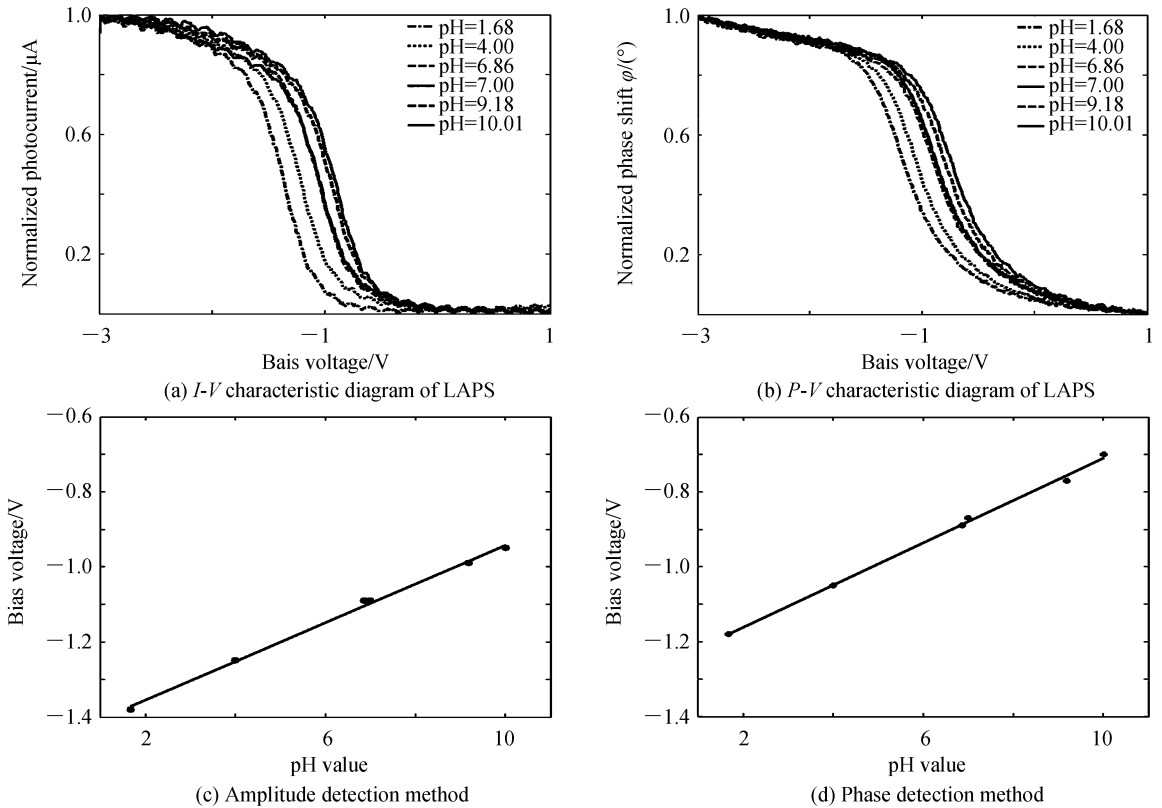


图 5 LAPS 对 pH 的检测结果
Fig.5 Detection results of pH by LAPS

图 6(a)和(b)为检测的 I - V 特性曲线和 P - V 特性曲线的局部放大图,当溶液的 pH 比较接近时,如 pH 为 6.86 和 7.00 的溶液,幅值检测方法检测到的两条曲线基本重合,而相位检测方法对两种溶液的 pH 具有较为良好的区分度,证明应用正交相位检波检测方法,能够提高 LAPS 检测的精度。

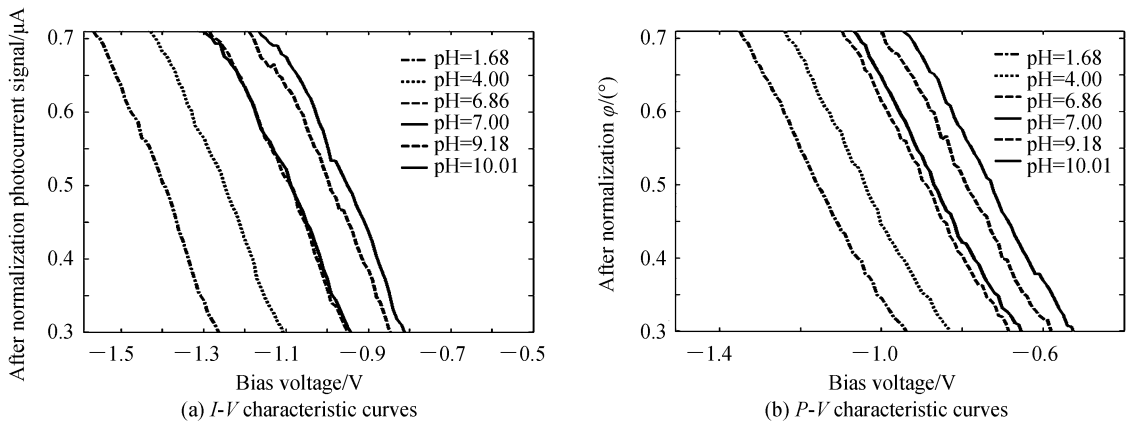


图 6 曲线局部放大图
Fig.6 Curve local magnification diagram

对于幅值检测方法,归一化后 I - V 特性曲线的拐点为 $0.5 \mu\text{A}$ 的点,对应的偏置电压为 -1.40 V ,对应的最大斜率为 -1.74 nA/V ,那么在该偏置电压下,1%的光电流变化对应的 pH 变化为

$$\frac{0.5 \text{ nA}}{1.74 \text{ nA/V}} \times 0.01 \times \frac{1}{51.6 \text{ mV/pH}} = 55.7 \text{ mpH} \quad (18)$$

即幅度检测方法下能够达到的精度^[18]为 55.7 mpH.

对于正交相位检波检测方法, 归一化后 P - V 特性曲线的拐点为 φ 为 0.5° 的点, 对应的偏置电压为 -0.90 V, 对应的最大斜率为 $-2.09^\circ/\text{V}$, 那么在该偏置电压下, 1% 的光电流变化对应的 pH 变化为

$$\frac{0.5^\circ}{2.09^\circ/\text{V}} \times 0.01 \times \frac{1}{58.6 \text{ mV}/\text{pH}} = 40.8 \text{ mpH} \quad (19)$$

即相位检测方法下能够达到的精度为 40.8 mpH.

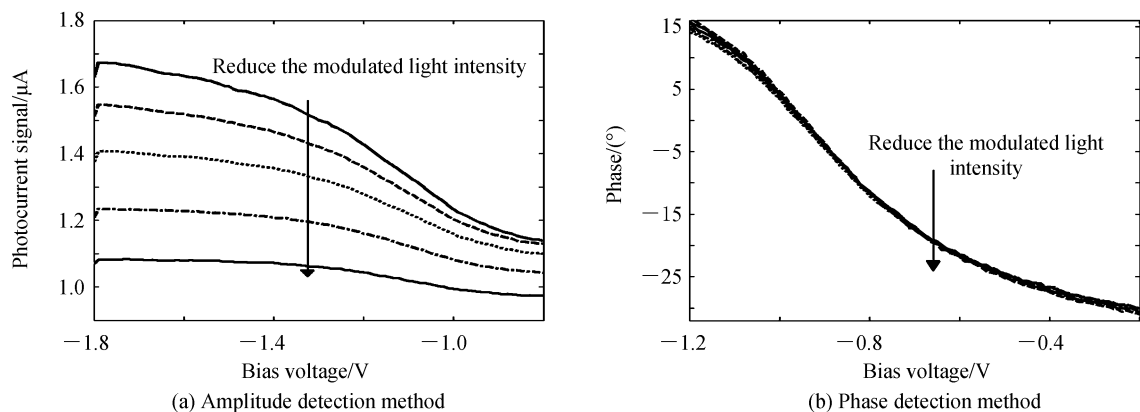


图 7 减弱光强对 I - V 特性曲线和 P - V 特性曲线的影响

Fig.7 The effect of weakening light intensity on I - V and P - V characteristic curve

图 7(a)和(b)展示了 I - V 特性曲线和 P - V 特性曲线中, 拐点处所对应的偏置电压附近的 pH 为 7 的溶液的检测结果. 可见, 固定偏置电压, 当调制光源的光照强度从 245 lux 减弱到 25 lux 时, 光电流的幅值变化较大, 而相位几乎为定值. 对比可见, 减弱光强对幅值的影响比较大, 而对相位的影响很小, 相位检测并不直接依赖于幅值. 因此, 弱光检测的情况更适合应用相位检测方法.

为了确定 LAPS 正交相位检波检测系统的稳定性, 在相同条件下对 LAPS 进行了 5 次重复性测试, 时间间隔约为 1 min. 通过相对标准偏差 (Relative Standard Deviation, RSD) 计算 LAPS 的重复率, 计算公式为

$$\text{RSD} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \times 100\% \quad (20)$$

式中, n 为检测次数, x_i 为每次检测结果, \bar{x} 为检测结果的平均值. 计算所得重复误差为 0.004%.

选用均方差 (Mean Squared Error, MSE) 及信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 作为抗噪声性能的评价指标. MSE 和 SNR 的表达式分别为

$$\text{MSE} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (21)$$

式中, m 为数据点个数, y_i 为原始数据, \hat{y}_i 为期望数据 (拟合直线上的值).

$$\text{SNR} = 10 \times \log \left[\frac{\sum_{i=1}^N f_i^2}{\sum_{i=1}^N (f_i - s_i)^2} \right] \quad (22)$$

式中, f_i 为去除噪声后的信号; s_i 为原始信号; N 为采样点数. 表 1 给出了在幅值检测模式和正交检波相位检测模式下的 MSE 和 SNR 计算结果.

表 1 两种模式对噪声抑制能力的对比

Table 1 Comparison of the two modes to the noise suppression capability

Mode	MSE	SNR/dB
Amplitude mode	0.8515×10^{-5}	41.593 8
Phase mode	0.7464×10^{-5}	49.876 5

从表 1 可以看出,应用正交相位检波检测算法的 MSE 更低,SNR 更高,即线性度更好,检测数据与期望数据的偏差更小,比幅值检测方法受噪声影响小。

4 结论

本文提出了一种基于正交相位检波的 LAPS 检测方法.理论和实验分析表明该检测方法具有实时性好、检测灵敏度高、测量精度高、信噪比高的优点.应用正交相位检波的检测方法比传统的幅值检测方法灵敏度增加了 7 mV/pH,精度提高了 14.9 mpH,信噪比增加了 8.282 7 dB.通过正交相位检波的 LAPS 检测方法可以实现较弱调制光源下对各种离子浓度的精准检测,对水质和血液中各物质浓度的检测和定量分析具有重要意义。

参考文献

- [1] HAFEMAN D G, PARCE J W, MCCONNELL H M. Light-addressable potentiometric sensor for biochemical systems [J]. *Science*, 1988, **240**(4856): 1182-1185.
- [2] ZHANG W, XU Y W, ZOU X B. Rapid determination of cadmium in rice using an all-solid RGO-enhanced light addressable potentiometric sensor[J].*Food Chemistry*, 2018, **261**: 1-7.
- [3] ÖZSOYLU D, KIZILDAG S, SCHONING M J, *et al.* Effect of plasma treatment on the sensor properties of a light addressable potentiometric sensor (LAPS)[J]. *Physica Status Solidi*, 2019, **216**(20): 1900259.
- [4] LI F, HU S, ZHANG R,*et al.* Porous graphene oxide enhanced aptamer specific circulating-tumor-cell sensing interface on light addressable potentiometric sensor: clinical application and simulation [J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2019, **11**(9): 8704-8709.
- [5] LIANG T, GU CH L, GAN Y, *et al.* Microfluidic chip system integrated with light addressable potentiometric sensor (LAPS) for real-time extracellular acidification detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, **301**: 127004.
- [6] DANTISM S, ROHLEN D, SELMER T, *et al.* Quantitative differential monitoring of the metabolic activity of *Corynebacterium glutamicum* cultures utilizing a light-addressable potentiometric sensor system[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, **139**: 111332.
- [7] DANTISM S, TAKENAGE S, WAGNER T, *et al.* Differential imaging of the metabolism of bacteria and eukaryotic cells based on light-addressable potentiometric sensors[J]. *Electrochimica Acta*, 2017, **246**: 234-241.
- [8] JIA Y F, LI F, JIA T T,*et al.* Meso-tetra(4-carboxyphenyl) porphine-enhanced DNA methylation sensing interface on a light-addressable potentiometric sensor[J]. *ACS Omega*, 2019, **4**(7): 12567-12574.
- [9] LEILA Z, ROYA T, MOINUL H C, *et al.* DNA-hybridization detection on Si(100) surfaces using light-activated electrochemistry: a comparative study between bovine serum albumin and hexaethylene glycol as antifouling layers[J]. *Langmuir*, 2018, **34**(49): 14817-14824.
- [10] DU L P, WANG J, CHEN W,*et al.* Dual functional extracellular recording using a light-addressable potentiometric sensor for bitter signal transduction[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2018, **1022**: 106-112.
- [11] WANG Xu, HA Da, ZHANG Wen. Wireless instrumentation design for heavy metals detection in water based on light addressable potentiometric sensor[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2014(1): 6-11.
王旭, 哈达, 张文. 基于光寻址电位传感器的水环境重金属无线检测仪器设计[J]. *传感技术学报*, 2014(1): 6-11.
- [12] DAS A, CHEN T C, YANG C M, *et al.* A high-speed, flexible-scanning chemical imaging system using a light-addressable potentiometric sensor integrated with an analog micromirror[J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2014, **198**(4): 225-232.
- [13] MIYAMOTO K I, KANEKO K, MATSUO A, *et al.* Miniaturized chemical imaging sensor system using an OLED display panel[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, **170**: 82-87.
- [14] MIYAMOTO K I, WAGNER T, YOSHINOBU T, *et al.* Phase-mode LAPS and its application to chemical imaging [J]. *Sensors and Actuators: B Chemical*, 2011, **154**(1): 28-32.
- [15] MIYAMOTO K I, WAGNER T, MIMURA S, *et al.* Constant-phase-mode operation of the light-addressable potentiometric sensor[J]. *Sensors and Actuators: B Chemical*, 2011, **154**(2): 119-123.
- [16] LIANG W G, HAN J H, ZHANG H, *et al.* Light addressable potentiometric sensor with an array of sensing regions [C]. SPIE, 2001, 4414:386-389.
- [17] WAGNER T, YOSHINOBU T, RAO C, *et al.* "All-in-one" solid-state device based on a light-addressable potentiometric sensor platform[J]. *Sensors & Actuators: B. Chemical*, 2006, **117**(2): 472-479.
- [18] WERNER C F, WAGNER T, MIYAMOTO K I, *et al.* High speed and high resolution chemical imaging based on a new type of OLED-LAPS set-up[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, **175**: 118-122.
- [19] YOSHINOBU T, SATO D, GUO Y Y, *et al.* Modeling of the return current in a light-addressable potentiometric sensor[J]. *Sensors*, 2019, **19**(20): 4566.
- [20] CHEN D, LIU S B, YIN S M, *et al.* Research on noise analysis and signal processing method of light addressable potentiometric sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(6): 1456-1464.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 61674122), Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No. 2018JM6032), Special Program for Scientific Research of Shaanxi Provincial Department of Education (No.17JK0694)