

文章编号 1004-924X(2016)06-1456-09

## 光寻址电位传感器的噪声分析与信号处理方法研究

陈东<sup>1,2</sup>, 刘诗斌<sup>1</sup>, 殷世民<sup>3,4</sup>, 梁晋涛<sup>3,4,5\*</sup>

- (1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710072; 2. 西安邮电大学工程学院, 陕西西安 710121;  
3. 桂林电子科技大学生命与环境科学学院, 广西桂林 541004;  
4. 广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西桂林 541004; 5. 广西信息科学实验中心, 广西桂林 541004)

**摘要:** 鉴于光寻址电位传感器(LAPS)的响应信号较弱, 传统的抽取频域基波分量的方法易受信号漂移和随机噪声的影响, 提出了一种基于频域分量均方根和卡尔曼滤波的两步信号处理方法。基于光寻址电位传感器的理论模型构建了其等效电路模型, 推导得到输出信号的表达式, 分析了漂移与噪声产生的原因及其抑制方法。通过实验检测了不同 pH 值的溶液, 并采集了系统输出的光电流信号。求取信号傅里叶变换后频域中的基波分量、二次谐波分量、三次谐波分量的谱线幅值的均方根, 然后对归一化电流-偏压(I-V)特性曲线进行卡尔曼滤波。实验结果表明, 相对于单纯抽取基波分量的方法, 基于频域分量均方根和卡尔曼滤波的两步信号处理方法使检测结果的均方差(MSE)降低了 97%, 显著减少了信号漂移和随机噪声对检测结果的影响。

**关键词:** 光寻址电位传感器; 信号漂移; 随机噪声; 频域分量均方根; 卡尔曼滤波

**中图分类号:** TP212.3; TN911.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1456

## Research on noise analysis and signal processing method of light addressable potentiometric sensor

CHEN Dong<sup>1,2</sup>, LIU Shi-bin<sup>1</sup>, YIN Shi-min<sup>3,4</sup>, LIANG Jin-tao<sup>3,4,5\*</sup>

- (1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China;  
3. School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;  
4. Guangxi key Laboratory of Automatic Detection Technology and Instrument, Guilin 541004, China;  
5. Guangxi Experiment Center of Information Science, Guilin 541004, China)

\* Corresponding author, E-mail: d.xljt@163.com

**Abstract:** Considering that the response signal of light addressable potentiometric sensor (LAPS) is quite week and the traditional method for extraction of fundamental component of frequency domain is easily impacted by signal drift and stochastic noise, a kind of two-step signal processing method based on the mean square root of component of frequency domain and Kalman filtering was proposed. Based on the theoretical model of devices of light addressable potentiometric sensor, the equivalent circuit model was established; the expression of output signal was deduced, and the causes of drifting and

收稿日期: 2016-02-01; 修订日期: 2016-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61265006); 广西自动检测技术与仪器重点实验室基金项目(No. YQ15113)

noise as well as inhibition methods were analyzed. Through tests, the solutes with different pH values were detected, and the photocurrent signal outputted by systems was collected. The mean square roots of breadth value of spectral line of fundamental component, second harmonic component and third harmonic component in the frequency domain after Fourier transformation were calculated. Then, the Kalman filtering was implemented for characteristic curve of normalized current-bias (I-V). The experimental results indicate that the two-step signal processing method based on the mean square root of component of frequency domain and Kalman filtering makes the mean square error (MSE) of testing result reduced by 97%, and the influences of signal drift and stochastic noise on testing result are obviously decreased compared to the simple method to extraction of fundamental component.

**Key words:** Light Addressable Potentiometric Sensor; signal drift; stochastic noise; Mean Square Root of Component of Frequency Domain; Kalman Filtering

## 1 引 言

光寻址电位传感器(Light-Addressable Potentiometric Sensor, LAPS)是一种新型的半导体硅传感器件。自从上世纪 80 年代末,Dean G. Hafeman 发明了 LAPS 以来,其一直被人们所关注与研究<sup>[1-5]</sup>。同传统的电化学测量方法相比,LAPS 具有灵敏度高,易于阵列化等优点。但是,LAPS 的响应信号十分微弱,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。为了使 LAPS 的响应信号能够更加准确地反映被测物质的电化学特性,必须要最大限度地抑制信号漂移和噪声干扰。

目前,用于提取 LAPS 响应信号的最主要方法是抽取频域基波分量<sup>[6-7]</sup>,其首先对 LAPS 信号进行带通滤波,将包含有用信号在内的一定频段范围内的信号截取出来,然后用傅里叶变换获得其频谱,最后将频谱中与光源同频率的基波分量的谱线幅值提取出来作为有用信号。这种方法能够去除大部分低频段和高频段的噪声信号,但无法解决信号漂移问题,也无法去除随机噪声干扰。近来有报道用小波阈值去噪方法来去除 LAPS 信号中的噪声<sup>[8]</sup>,但选择合适的阈值比较困难,阈值过小难以将噪声完全去除,而阈值过大又会造成有用信号的损失,目前基本上都是通过反复的试验,根据信号小波系数的统计特性来估计阈值<sup>[9-11]</sup>。

本文在分析 LAPS 基本工作原理的基础上,提出了 LAPS 耗尽层中空间电荷区的等效电路模型,并据此分析了信号漂移产生的原因,以及抑

制信号漂移的有效途径。根据分析结果,文中对 LAPS 输出信号频谱中的基波分量、二次谐波分量、三次谐波分量的谱线幅值计算均方根(Root-Mean-Square, RMS),鉴于卡尔曼滤波对随机噪声信号具有较强的过滤作用<sup>[12-15]</sup>,本文用其去除叠加在 I-V 特性曲线上的随机噪声。

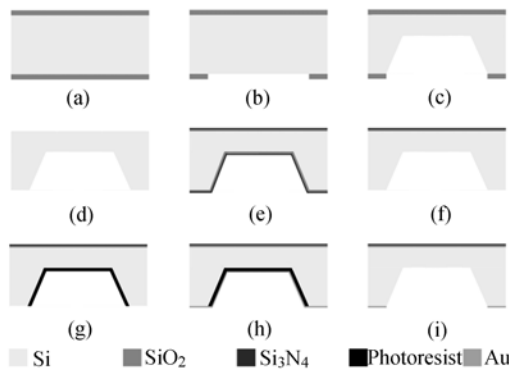
## 2 LAPS 器件及其测量系统

### 2.1 LAPS 结构及特性

实验使用的硅片为 N 型硅(电阻率为  $1 \sim 5 \Omega \cdot \text{cm}$ ,晶向  $\langle 100 \rangle$ ,硅片厚度为  $300 \mu\text{m}$ ),LAPS 器件的制作过程如图 1 所示。

由图 1 可知,先在硅衬底表面热氧化  $1 \mu\text{m}$  厚的  $\text{SiO}_2$  薄膜;然后,去除衬底底面中部的氧化层,并在此处刻蚀出深  $250 \mu\text{m}$ 、长  $6 \text{mm}$ 、宽  $6 \text{mm}$  的正方形深槽;刻蚀结束后,洗去衬底表面残留的氧化物;在衬底表面先后沉积  $100 \text{nm}$  的  $\text{SiO}_2$  薄膜和  $50 \text{nm}$  的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜,然后去除衬底底面的  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ;在深槽表面覆盖一层光刻胶薄膜,并磁控溅射一层  $100 \text{nm}$  的 Au 薄膜(以  $20 \text{nm}$  的 Cr 作为黏附层);最后通过剥离工艺形成与硅衬底欧姆接触的工作电极;LAPS 器件的最终结构如图 1(i)所示。

LAPS 是一种表面电位传感器,本例中当在 LAPS 表面施加负的偏置电压时,分布于氧化层-硅界面处的多数载流子(自由电子)被推离界面,从而在氧化层-硅界面处形成耗尽层(空间电荷区)。一束经过交流幅度调制的人射光照射到 LAPS 底部,激发出大量的光生电子-空穴对,由于浓度的差别,一部分光生空穴将向耗尽层扩散,



(a) 硅衬底表面热氧化厚 SiO<sub>2</sub> 层. (b) 去除硅衬底底面中部的 SiO<sub>2</sub> 层. (c) 硅衬底底部刻蚀深槽. (d) 去除硅衬底表面的厚 SiO<sub>2</sub> 层. (e) 沉积 SiO<sub>2</sub> 薄膜和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜. (f) 去除硅衬底底面的 SiO<sub>2</sub> 和 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. (g) 在深槽表面覆盖光刻胶薄膜. (h) 硅衬底底面溅射沉积 Au 薄膜(以 Cr 为黏附层). (i) 剥离形成工作电极.

(a) SiO<sub>2</sub> thick film formed on silicon by thermal oxidation. (b) Central SiO<sub>2</sub> thick film removed. (c) Deep trench etched on bottom of silicon. (d) Remaining SiO<sub>2</sub> thick film removed. (e) SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> thin film deposited on silicon. (f) SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> thin film on bottom of silicon removed. (g) Photoresist film covered on surface of trench. (h) Au thin film deposited on bottom of silicon substrate (Cr as adhesion layer) by magnetron sputtering. (i) Working electrode constructed by lift-off technology.

图 1 LAPS 的制作过程

Fig. 1 Fabrication process of LAPS

并在耗尽层的边界处受空间电场作用向上漂移, 形成交变的光生电势。光生电势的幅度与空间电场的强度有关, 而该空间电场的强度除了与偏置电压有关以外, 还与 LAPS 表面的电势有关, 因而在一定的偏置电压下, 测量该光生电势即可检测出 LAPS 表面电势的大小。在实际检测中, 测量的对象是光生电势在外部回路中感应出的电流。

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 对溶液中的 H<sup>+</sup> 离子具有较强的吸附能力, 这是因为 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 与溶液的固/液两相界面处存在 OH 羟基基团和 NH<sub>2</sub> 胺基基团, 这两种基团对 H<sup>+</sup> 有较强的结合力。这样大量的 H<sup>+</sup> 离子便吸附在了 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 薄膜表面, 从而改变了固/液两相界面的相界电势, 显然该电势的大小与溶液中 H<sup>+</sup> 的浓度有关。根据 LAPS 的基本工作原理, 通过测量外部回路中的光生电流就可以检测出溶

液的 pH 值(H<sup>+</sup> 的浓度的对数)。

2.2 测量系统构建

LAPS 测量系统的结构框图如图 2 所示, LAPS 传感器和测量装置的实物照片如图 3 所示。实验中使用的电解液是 pH 值分别为 4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.18 的 pH 缓冲液。光源采用波长为 620 nm、功率为 2 mW 的红色发光二极管(LED), 调制信号为 4 kHz 的正弦波, 由 NI 数据采集卡 (NI PXI-6259) 提供, 光源驱动电路为

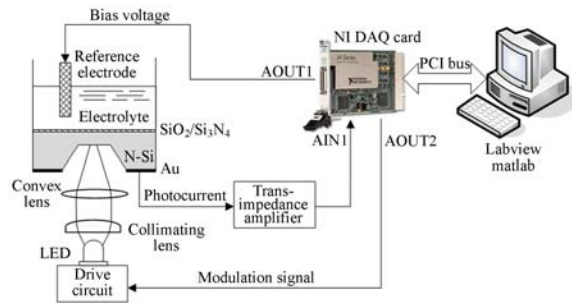
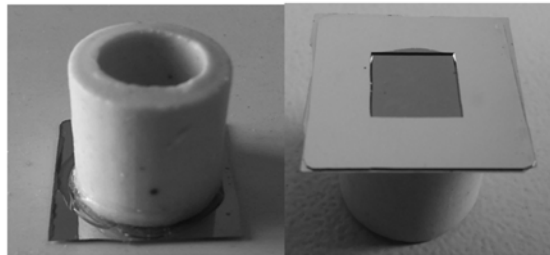


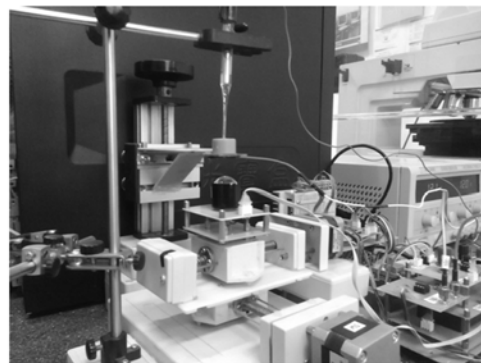
图 2 LAPS 测量系统的结构框图

fig. 2 Structure diagram of LAPS measurement system



(a) LAPS

(a) LAPS



(b) 测量装置

(b) Measuring equipment

图 3 LAPS 传感器和测量装置照片

Fig. 3 Photographs of LAPS and measuring equipment

恒流驱动电路。光源经准直透镜和凸透镜聚焦为衬底底面上的一个  $\Phi 3\text{ mm}$  的光斑。参比电极为 Ag/AgCl 电极,  $-2.5\text{ V} \sim +0.5\text{ V}$  的偏置电压由 NI 数据采集卡提供,电压步进值为  $0.01\text{ V}$ 。LAPS 输出的光电流信号经跨阻放大器放大,放大后的信号由 NI 数据采集卡采样并传送到计算机上,由 Labview 和 MATLAB 软件对信号进行处理。

图 4 所示为实际采集的 LAPS 输出光电流信号,检测对象为  $\text{pH}=7.0$  的  $\text{pH}$  缓冲液,偏置电压为  $-1\text{ V}$ 。

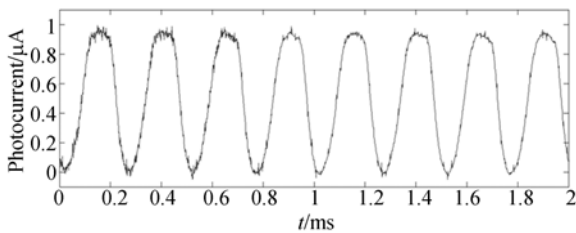


图 4 LAPS 输出光电流信号  
Fig. 4 Photocurrent signal output of LAPS

### 3 LAPS 信号噪声分析与处理

LAPS 本身是一种电容型传感器<sup>[16]</sup>,其响应信号的实质为光生载流子对空间电荷区的充放电<sup>[17]</sup>。LAPS 的理论模型<sup>[18-19]</sup>如图 5 所示,其中电阻  $R$  包括电解液内阻、参比电极内阻和测量电路的输入电阻,电容  $C_i$  包括绝缘层电容和电解液/绝缘层界面的 Helmholtz 双电层的电容。电容  $C_d$  是耗尽层中的空间电荷区电容, $R_p$  是耗尽层电阻。 $U_{\text{bias}}$  为偏置电压, $i_{\text{ph}}$  为耗尽层中光生载流子定向移动产生的光生电流, $i$  为测量电路中的检测电流。

LAPS 中的光生载流子扩散到耗尽层中,受空间电场作用作定性移动,对耗尽层中的空间电荷区进行充电,形成光生电势,这种光生电势作用在测量电路中就形成了检测电流。根据这个工作原理,可以得到耗尽层中空间电荷区的等效电路模型,如图 6 所示。

根据图 6,由电容性质,如式(1)所示, $Q(t)$  为电容  $C_d$  中的电量。

$$Q(t) = C_d u_c(t), \quad (1)$$

可得电容的充电电流  $i_c(t)$ :

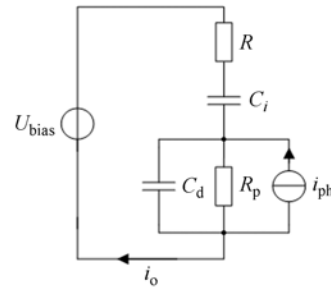


图 5 光寻址电位传感器的理论模型  
Fig. 5 Theoretical model of LAPS

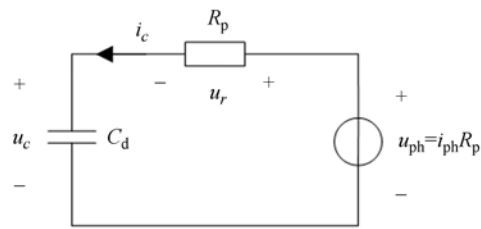


图 6 耗尽层中空间电荷区的等效电路模型  
Fig. 6 Equivalent circuit model of space charge region in depletion layer

$$i_c(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d}{dt}(C_d u_c(t)) = C_d \frac{du_c(t)}{dt}, \quad (2)$$

将式(2)代入到回路电压方程(3)中,设光生电势  $u_{\text{ph}}(t)$  为正弦信号  $A \sin(\omega t)$ ,可得微分方程(4)。

$$u_c(t) + u_r(t) = u_{\text{ph}}(t), \quad (3)$$

$$\frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{R_p C_d} u_c(t) = \frac{A}{R_p C_d} \sin \omega t. \quad (4)$$

对方程(4)求解,可得电容  $C_d$  两端的电压如式(5):

$$u_c(t) = \frac{1}{1 + \omega^2 R_p^2 C_d^2} \cdot \left[ A \sin \omega t - A \omega R_p C_d \cos \omega t + A \omega R_p C_d \exp\left\{-\frac{t}{R_p C_d}\right\} \right]. \quad (5)$$

在外部检测电路中感应出的电流如式(6)所示,其中  $\omega_0 = 1/RC_i$ 。

$$i_o(t) = \frac{u_c(t)}{R + \frac{1}{j\omega C_i}} = \frac{u_c(t)}{R} \left[ \frac{1}{1 - j \frac{\omega_0}{\omega}} \right]. \quad (6)$$

可见,外部回路中的电阻  $R$  和绝缘层电容  $C_i$  决定了 LAPS 输出信号的下限频率,当调制信号频率远大于  $\omega_0$  时,可以忽略  $C_i$  的影响,则电流方

程如式(7)所示,其中,特征频率  $\omega_0 = 1/R_p C_d$ ,相移  $\varphi = \arctan(\omega/\omega_0)$ ,光电流  $i_o(t)$  为与光源调制信号  $u_{ph}(t)$  同频率的周期性信号。

$$i_o(t) = \frac{A}{R \sqrt{1+(\omega/\omega_0)^2}} \sin(\omega t - \varphi) + \frac{A(\omega/\omega_0)}{R(1+(\omega/\omega_0)^2)} \exp(-\omega_0 t), \quad (7)$$

式(7)中第一项为基波分量,其幅值和相位均受到  $\omega_0$  的影响;第二项则包含频率是基波分量整数倍的谐波分量。耗尽层电阻  $R_p$  和电容  $C_d$  受偏置电压和光照强度的影响较大<sup>[20-21]</sup>,偏置电压和光照强度的微小漂移会使特征频率  $\omega_0$  发生变化,从而引起第一项的幅值和相位发生漂移。在第二项中,  $\frac{A(\omega/\omega_0)}{R(1+(\omega/\omega_0)^2)}$  和  $\exp(-\omega_0 t)$  随  $\omega_0$  变化的方向相反,因此在  $\omega_0$  发生微小波动时,该项可以保持相对稳定。因此提取完整的光电流信号  $i_o(t)$  应当比单纯提取基波分量受  $\omega_0$  波动影响更小一些。这里采用计算信号频域分量的均方根值的处理办法,LAPS 输出光电流信号的频谱图如图 7 所示。

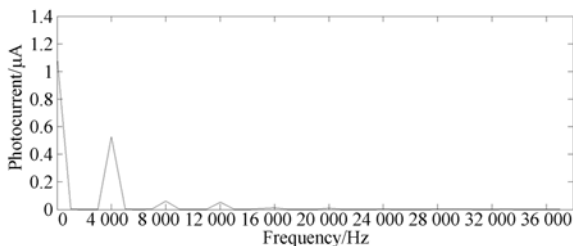


图 7 LAPS 输出光电流信号的频谱图

Fig. 7 Frequency spectrogram of LAPS photocurrent signal

从图 7 中可以看到,频谱中最主要的交流分量是与光源调制信号同频率的基波分量,接下来是二次谐波分量和三次谐波分量,四次及以上的谐波分量幅值要小很多。因此这里只对频域中的基波分量、二次谐波分量、三次谐波分量的谱线幅值计算均方根,计算公式如式(8)所示:

$$I = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}{3}}, \quad (8)$$

其中,  $I_1$  为基波分量的峰值,  $I_2$ 、 $I_3$  分别为二次谐波分量、三次谐波分量的峰值。

除信号漂移外,LAPS 输出信号中还夹杂着大量的随机噪声,如光电器件所常有的散粒噪声和热噪声<sup>[22]</sup>,以及跨阻放大器中的噪声等,这些

噪声均属于功率谱均匀分布的高斯白噪声。这些噪声的存在会使得 LAPS 的响应信号发生随机波动,严重影响检测的准确性。对于高斯白噪声,通常采用的方法为均值滤波法、中值滤波法、多次采样平均法等。但这些处理方法通常应用于检测信号的统计特性未知的情况下,滤波效果一般。而在检测信号的统计特性已知的情况下,通常采用基于最小均方误差准则的滤波方法,如维纳滤波、卡尔曼滤波等,由于卡尔曼滤波计算简便、快速,适用范围广,因而实际工程中的应用远比维纳滤波广泛。考虑到 LAPS 信号的统计特性是已知的,因此采用卡尔曼滤波的信号处理方法以获取更好的滤波效果。图 8 所示为本文所采用的信号处理流程,首先对放大后的 LAPS 原始信号进行高通滤波,然后经 FFT 变换到频域,再计算频域中基波分量、二次谐波分量、三次谐波分量谱线幅值的均方根,最后用卡尔曼滤波去除随机噪声。

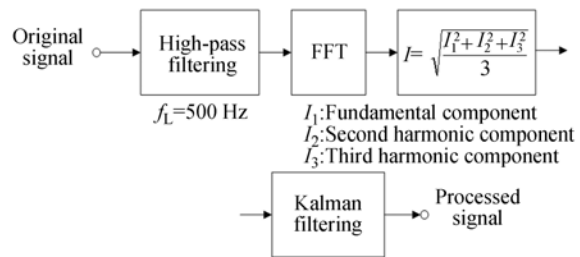


图 8 信号处理流程

Fig. 8 Procedure of signal processing

对 LAPS 原始信号的处理,传统上采用抽取频域基波分量的方法,首先通过带通滤波器在原始信号中截取包含有用信号在内的一段信号,然后通过 FFT 变换到频域,最后以基波分量的谱线幅值作为最终 LAPS 的响应信号。实验中 LAPS 输出的光电流信号经过下限截止频率为 2 kHz,上限截止频率为 6 kHz 的带通滤波器滤波,然后再将滤波后的信号通过 FFT 变换到频域,最后抽取 4 kHz 基波分量的谱线幅值作为 LAPS 的响应信号,所得的归一化 I-V 特性曲线如图 9(a)所示。

作为对比,将 LAPS 输出的原始信号通过截止频率为 500 Hz 的高通滤波器,以去除 500 Hz 以内的低频噪声信号,然后通过 FFT 将滤波后的信号变换到频域,再对频域中的基波分量、二次谐波分量、三次谐波分量的谱线幅值计算均方根,所

得值作为 LAPS 的响应信号,绘制归一化 I-V 特性曲线如图 9(b)所示。

最后,用卡尔曼滤波对归一化 I-V 特性曲线进行平滑滤波,以去除 I-V 特性曲线上的随机波动,滤波后的归一化 I-V 特性曲线如图 9(c)所示。

下面说明用于 LAPS 信号处理的卡尔曼滤波的算法过程。经过对测量值的统计分析可知,归一化 I-V 特性曲线上相邻两点之间的差值很小(最小处 $<0.0001$ ,最大处 $<0.01$ ),所以状态方程按式(9)建立:

$$x_{k|k-1} = x_{k-1|k-1}. \quad (9)$$

在状态方程中, $x_{k-1|k-1}$ 是偏置电压为  $u_{k-1}$  时的 LAPS 响应信号的最优估计值, $x_{k|k-1}$ 是偏置电压为  $u_k$  时由  $x_{k-1|k-1}$  预测的 LAPS 响应信号的估计值。本文利用实测值  $y_k$  和估计值  $x_{k|k-1}$  之差的加权值作为估计误差来校正估计值  $x_{k|k-1}$ ,得到偏置电压为  $u_k$  时的 LAPS 响应信号的最优估计值  $x_{k|k}$ ,如式(10)所示:

$$x_{k|k} = x_{k|k-1} + H_k(y_k - x_{k|k-1}), \quad (10)$$

其中, $H_k$  为卡尔曼增益,其值由式(11)计算:

$$H_k = P_{k|k-1} (P_{k|k-1} + R_k)^{-1}, \quad (11)$$

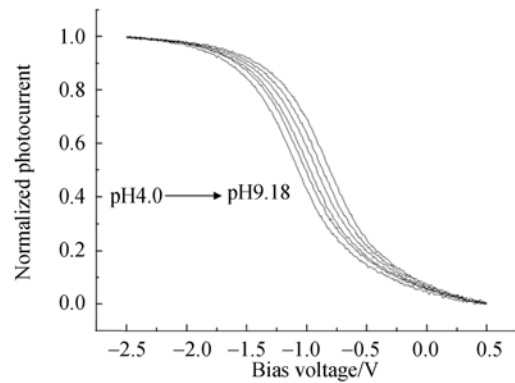
其中, $P_{k|k-1}$ 是偏置电压为  $u_k$  时的估计误差, $R_k$  为测量噪声的协方差,根据对实测信号噪声的统计分析,将  $R_k$  设定为常数 0.05。 $P_{k|k-1}$  的值由式(12)~(13)确定, $Q_{k-1}$ 为过程方差,反映 I-V 特性曲线上相邻两个点的数值方差,因为 I-V 特性曲线上相邻两点之间的差值很小,这里设定为常数  $Q_{k-1} = 0.0001$ 。

$$P_{k|k-1} = P_{k-1|k-1} + Q_{k-1}, \quad (12)$$

$$P_{k|k} = (I - H_k) P_{k|k-1}, \quad (13)$$

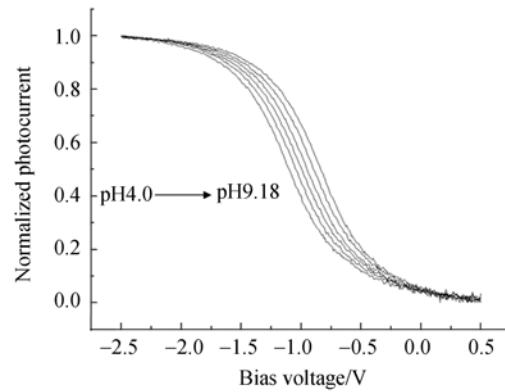
$P_{k-1|k-1}$ 是偏置电压为  $u_{k-1}$  时的最优估计值的估计误差。初值的设置不重要,因为随着卡尔曼滤波的进行,系统会快速收敛,这里以第一个实测值作为  $x_{k|k}$  的初始值  $x_{0|0}$ ,以 10 作为  $P_{k|k}$  初值  $P_{0|0}$ ,开始卡尔曼滤波的迭代递推过程,将历次递推得到的估计值序列  $\{x_{k|k}\}$  作为卡尔曼滤波后的输出信号。

从图 9 可以看出,与单纯抽取基波分量幅值的方法相比,通过计算频域分量的均方根值得到的 I-V 特性曲线从左至右水平分布比较均匀,与溶液 pH 值的分布基本成比例,表明该方法对信号漂移有一定的抑制作用。而应用第三种方法,



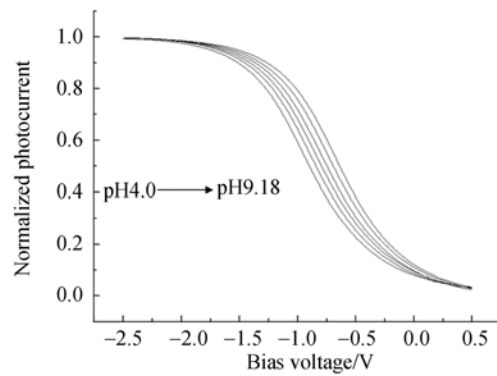
(a) 抽取基波分量幅值

(a) Extracting amplitude of fundamental component



(b) 计算频域分量的均方根值

(b) Calculating RMS of frequency domain components



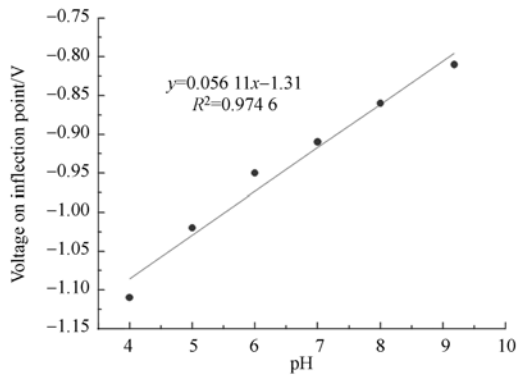
(c) 先计算频域分量的均方根值再卡尔曼滤波

(c) Kalman filtering after calculating RMS of frequency domain components

图 9 3 种信号处理方法得到的 LAPS 的归一化 I-V 特性曲线

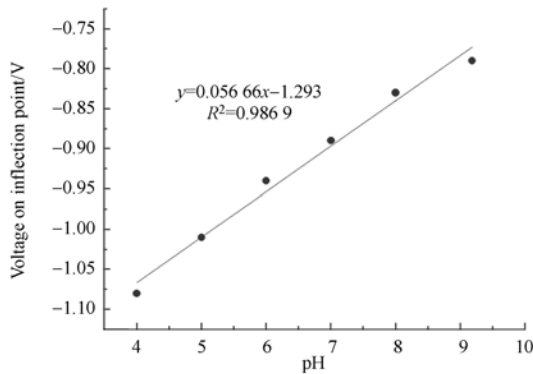
Fig. 9 Normalized I-V curves of LAPS obtained by the three kinds of signal processing methods

即先计算频域分量的均方根值再卡尔曼滤波得到



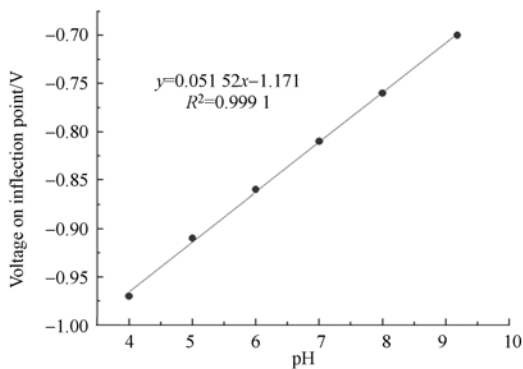
(a) 抽取基波分量幅值

(a) Amplitude extracting of fundamental component



(b) 计算频域分量的均方根值

(b) RMS calculating of frequency domain components



(c) 先计算频域分量的均方根值再卡尔曼滤波

(c) Kalman filtering after calculating RMS of frequency domain components

图 10 3 种信号处理方法得到的拐点电位与的 pH 值对应关系

Fig. 10 Relation between voltage on inflection point and pH value obtained by the three kinds of signal processing methods

的 I-V 特性曲线则进一步抑制了 I-V 特性曲线上

的随机波动。

采用恒流模式的检测方法<sup>[23]</sup>,得到的 I-V 特性曲线拐点电位与 pH 值的对应关系如图 10 所示,图中直线是对各数据点进行直线拟合的结果。

理论上拐点电位与 pH 值之间应该是线性的<sup>[1]</sup>,但是由于 I-V 特性曲线上存在波动,会使检测结果出现偏差。本文选用均方差(MSE)作为去噪效果的评判标准,其表达式如式(14)所示:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (14)$$

其中,  $n$  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)。MSE 反映了原始数据与期望数据之间的差距。表 1 中列出了应用 3 种信号处理方法对检测结果的 MSE 的影响。

表 1 3 种信号处理方法对检测结果的 MSE 的影响

Tab. 1 Influence of three kinds of signal processing methods on MSE of detection results

Parameter	Fig. (a)	Fig. (b)	Fig. (c)
MSE	0.000 378	0.000 196	0.000 011

从表 1 中可以看出,先计算频域分量均方根值再卡尔曼滤波的信号处理方法 MSE 最低,也就是原始数据与期望数据的差距最小,各原始数据更趋于理想的线性关系。因而相比于前两种方法,采用先计算频域分量均方根值再卡尔曼滤波的两步信号处理方法,可以获得更优的去噪效果。

## 4 结 论

本文分析了噪声对 LAPS 输出光电流信号的影响,讨论了单纯抽取基波分量幅值所存在的问题,提出了基于频域分量均方根和卡尔曼滤波的两步信号处理方法。通过计算光电流信号中的基波分量、二次谐波分量、三次谐波分量的均方根值,以减少信号漂移对检测结果的影响,同时采用卡尔曼滤波消除叠加在 I-V 特性曲线上的随机噪声信号。实验证明,这种新的信号处理方法使检

测结果的均方差降低了97%,去噪效果明显,有

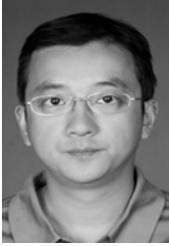
利于提高检测结果的可靠性。

### 参考文献:

- [1] DEAN G, HAFEMAN J, WALLACE P, *et al.*. Light-Addressable Potentiometric Sensor for Biochemical Systems [J]. *Science*, 1988, 240 (4856):1182-1185.
- [2] MOURZINA Y, YOSHINOBU T, SCHUBERT J, *et al.*. Ion-selective light-addressable potentiometric sensor (LAPS) with chalcogenide thin film prepared by pulsed laser deposition [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, 80(2): 136-140.
- [3] WAGNER T, MOLINA R, YOSHINOBU T, *et al.*. Handheld multi-channel LAPS device as a transducer platform for possible biological and chemical multi-sensor applications [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 53(2): 305-311.
- [4] STEIN B, GEORGE M, GAUB H E, *et al.*. Extracellular measurements of averaged ionic currents with the light-addressable potentiometric sensor (LAPS) [J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2004, 98(2-3):299-304.
- [5] WERNER C F, WAGNER T, MIYAMOTO K, *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 (S1):118-122.
- [6] ZHANG Q T, WANG P, WOLFGANG J. Parak, *et al.*. A novel design of multi-light LAPS based on digital compensation of frequency domain [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, 73 (s2-3): 152-156.
- [7] WAGNER T, MOLINA R, YOSHINOBU T, *et al.*. Handheld multi-channel LAPS device as a transducer platform for possible biological and chemical multi-sensor applications [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 53(2): 305-311.
- [8] LIU Q J, YE W W, YU H, *et al.*. Neurochip based on light-addressable potentiometric sensor with wavelet transform denoising [J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2010, 11(5): 323-331.
- [9] LACAUX C, MULLER-GUEUDIN A, RANTA R, *et al.*. Convergence and performance of the peeling wavelet denoising algorithm [J]. *Metrika*, 2014, 77(4): 509-537.
- [10] 杨唐文,陈盼飞,韩建达,等. 穿刺针尖光纤力传感信号的小波变换分析[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(8):2149-2157.
- YANG T W, CHEN P F, HAN J D, *et al.*. Wavelet transform analysis of optic fiber force sensing signals at puncture needle tip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2149-2157. (in Chinese)
- [11] 徐冬,孙蕾,罗建书. 结合 NAPCA 和复小波变换的高光谱遥感图像去噪[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(1):327-334.
- XU D, SUN L, LUO J SH. Denoising of hyperspectral remote sensing imagery using NAPCA and complex wavelet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (1): 327-334. (in Chinese)
- [12] JOHNS C J, MANDEL J. A two-stage ensemble Kalman filter for smooth data assimilation [J]. *Environmental & Ecological Statistics*, 2008, 15 (1): 101-110.
- [13] AL-SHABI M, GADSDEN S A, HABIBI S R. Kalman filtering strategies utilizing the chattering effects of the smooth variable structure filter [J]. *Signal Processing*, 2013, 93(2): 420-431.
- [14] 邓永停,李洪文,王建立. 基于卡尔曼滤波器的交流伺服系统自适应滑模控制[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8):2088-2095.
- DENG Y T, LI H W, WANG J L. Adaptive sliding mode control for AC servo system based on Kalman filter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (8): 2088-2095. (in Chinese)
- [15] 刘涛,张文平,陈慧芳,等. 卡尔曼滤波在分布式拉曼光纤温度传感系统去噪中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5):1643-1647.
- LIU T, ZHANG W P, CHEN H F, *et al.*. Reduction of system noise in distributed optical fiber Raman temperature sensor by Kalman filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1643-1647. (in Chinese)
- [16] POGHOSSIAN A, YOSHINOBU T, SIMONIS A. Penicillin detection by means of field-effect based sensors: EnFET, capacitive EIS sensor or LAPS [J]. *Sensors and Actuators B*, 2001, 78 (s1-3): 237-242.
- [17] GUO Y Y, MIYAMOTO K, WAGNER T, *et al.*. Theoretical study and simulation of light-address-

- sable potentiometric sensors [J]. *Physica Status Solidi A*, 2014, 211(6):1467-1472.
- [18] YOSHINOBU T, MIYAMOTO K, WAGNER T, *et al.*. Recent developments of chemical imaging sensor systems based on the principle of the light-addressable potentiometric sensor [J]. *Sensors and Actuators B*, 2015, 207(SD):926-932.
- [19] WERNER C F, WAGNER T, YOSHINOBU T, *et al.*. Frequency behaviour of light-addressable potentiometric sensors [J]. *Physica Status Solidi A*, 2013, 210(5): 884-891.
- [20] MIYAMOTO K, WAGNER T, YOSHINOBU T, *et al.*. Phase-mode LAPS and its application to chemical imaging [J]. *Sensor and Actuators B*, 2011, 154(1): 28-32.
- [21] BOUSSE L, MOSTARSHED S, HAFEMAN D. Investigation of carrier transport through silicon wafers by photocurrent measurements [J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75(8): 4000-4008.
- [22] 周玉蛟,任侃,钱惟贤,等. 基于光电二极管反偏的光电检测电路的噪声分析[J]. *红外与激光工程*, 2016,45(1): 1-6 .
- ZHOU Y J, REN K, QIAN W X, *et al.*. Noise analysis of photoelectric detection circuit based on photodiode reverse bias [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1):1- 6. (in Chinese)
- [23] YANG J H, LU T F, WANG J C, *et al.*. LAPS with nanoscaled and highly polarized HfO<sub>2</sub> by CF<sub>4</sub> plasma for NH<sub>4</sub><sup>+</sup> detection [J]. *Sensors and Actuators B*, 2013, 180: 71-76.

#### 作者简介:



陈东(1978—),男,四川南充人,讲师,博士研究生,2000年于西安工业大学获得学士学位,2005年于西安电子科技大学获得硕士学位,主要从事半导体生物传感器方面的研究。E-mail: dchen402@21cn.com

#### 导师简介:



刘诗斌(1960—),男,河南巩义人,教授,博士生导师,2001年于西北工业大学获得博士学位,长期从事无人机电感器系统研究工作,研究领域为磁场和压力测量,智能传感器系统,微电子和计算机应用。E-mail: liushibin@nwpu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)