

# SG 滤波在朗缪尔探针信号处理中的应用

桑庆双, 程 健

(中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027)

**摘 要:** 利用朗缪尔探针检测射频耦合等离子体特性参数时, 测得的伏安特性曲线会受电磁干扰而产生畸变, 从而影响等离子体参数的计算和特性分析。为此, 利用 Savitzky-Golay(SG)滤波算法对伏安特性曲线进行分段滤波, 给出平滑效果较好的特性参数。实验结果表明, SG 算法对原始信号特征改变较少, 求出的电子能量概率函数准确度较高。

**关键词:** 朗缪尔探针; 等离子体; 伏安特性曲线; SG 滤波; 电子能量概率函数

## Application of SG Filtering in Langmuir Probe Signal Processing

SANG Qing-shuang, CHENG Jian

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**【Abstract】** While measuring radio frequency plasma's parameters by Langmuir probe, the I-V characteristic curve is always distorted by electromagnetic interference, and this influences the parameters calculation and analysis. This paper adopts a Savitzky-Golay(SG) filtering algorithm which is used for smoothing I-V characteristic curve, and this brings accurate parameters. Experimental results show Savitzky-Golay filtering of the divided I-V characteristic can bring low signal distortion rate and high accurate Electron Energy Probability Function(EEPF).

**【Key words】** Langmuir probe; plasma; I-V characteristic curve; Savitzky-Golay(SG) filtering; Electron Energy Probability Function(EEPF)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.17.074

### 1 概述

朗缪尔探针是用于检测等离子体特性参数的一种基本诊断工具, 可以从探针的伏安特性曲线(I-V 曲线)计算出等离子体的电子温度、密度、空间电位、悬浮电位和电子能量概率函数(Electron Energy Probability Function, EEPF)等重要参数。朗缪尔探针结构简单, 又有一定的空间分辨率。特别是在低温等离子体的研究中, 它是一种非常实用的诊断工具<sup>[1]</sup>。

得到准确的 EEPF 在等离子体实验中非常重要。对于复杂化学反应中的等离子体, 不能直接计算得到 EEPF, 通过对静电探针的伏安特性曲线的二次求导求出 EEPF 是一种相对简单的方式。然而在对伏安特性曲线的二次求导过程中, 很小的噪声都能够被放大, 直接导致数据出现较大偏差<sup>[2]</sup>。朗缪尔探针的伏安特性曲线通常都会受到电磁干扰而产生畸变。因此, 在求导之前, 对伏安特性曲线进行平滑滤波处理是得到准确电子能量概率函数的前提。为此, 本文利用 Savitzky-Golay(SG)滤波算法对伏安特性曲线进行处理。

### 2 实验装置

本文的朗缪尔探针测量实验采用一套射频等离子体装置, 实验系统由一个平板二级射频放电反应室 M、射频电源、自动阻抗匹配器 A、滤波电路、自动静电探针测量仪 T 和计算机组成, 如图 1 所示。

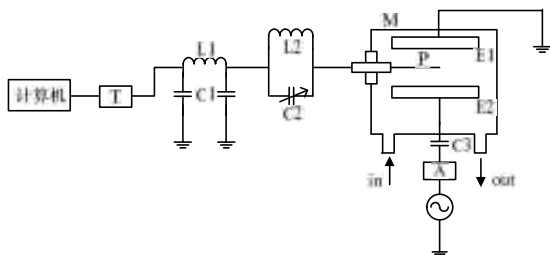


图1 射频等离子体实验装置

该实验装置中, 探针 P 暴露于等离子体中, 其余部分套上玻璃细管与等离子体隔离开来。上下电极  $E_1$ 、 $E_2$  相距 5 cm, 探针位于上下电极之间。整个反应室是用透明的石英玻璃做的, 能观察到里面的放电情况。自动静电探针测量仪是实验室自主研发的仪器, 能在计算机的控制下完成测量工作, 并且能将所测的数据传给计算机。

### 3 朗缪尔探针诊断原理

#### 3.1 单探针测量原理

单探针是直接深入到真空室内的, 通过在探针和金属管壁施加之间施加正负对称的锯齿波扫描电压, 调节加在探针上的电压值, 然后测出流过探针与金属管壁的电流。通过记录多点电压值对应的电流值, 即可描绘出单探针伏安特性曲线, 如图 2 所示。典型的静电探针伏安特性曲线可以分为 3 个部分: 离子饱和区, 过渡区, 电子饱和区。

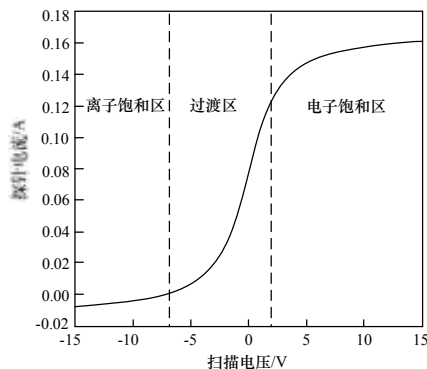


图2 单探针伏安特性曲线

**作者简介:** 桑庆双(1986—), 女, 硕士研究生, 主研方向: 嵌入式系统, 数字信号处理, 智能设备; 程 健, 高级工程师、硕士  
**收稿日期:** 2011-02-22 **E-mail:** sqshuang@mail.ustc.edu.cn

### 3.2 等离子体参数

电子能量分布函数(Electron Energy Distribution Function, EEDF)与探针的伏安特性曲线有如下关系:

$$g_e(E) = \frac{2m}{e^2 S} \left( \frac{2eV}{m} \right)^{1/2} \frac{d^2 I_e}{dV^2} \quad (1)$$

其中,  $E = e(V_p - V)$ , 单位是 eV;  $V_p$  是等离子体电位, 即 I-V 曲线一次微分的最大值, 也是二次微分的过零点;  $V$  是探针电位;  $m$  是电子质量;  $S$  为探针表面积, 即裸露在等离子体中的探针丝长度与探针截面周长的乘积, 单位为  $m^2$ 。

EEPF 与 EEDF 有如下关系:

$$g_p(E) = E^{-1/2} g_e(E) = \frac{2(2m)^{1/2}}{e^2 S} \frac{d^2 I_e}{dV^2} \quad (2)$$

电子温度为:

$$T_e = -(V_F / \ln(I_e / I_i)) \quad (3)$$

其中,  $V_F$  是等离子体的浮悬电位;  $I_e$  为电子饱和电流;  $I_i$  为离子饱和电流。

电子密度为:

$$n_e = \frac{I_i}{0.61eS \sqrt{\frac{2T_e}{m_i}}} \quad (4)$$

其中,  $I_i$  为离子饱和电流值;  $S$  为探针表面积;  $m_i$  为等离子体中离子的质量;  $T_e$  为等离子体的电子温度。

$I_e$  的近似值取电子饱和区的切线与过零点的切线的交点对应的电流值,  $I_i$  的近似值取离子饱和区的切线与过零点的切线的交点对应的电流值。EEPF、电子温度和电子密度的求解都会用到 I-V 特性曲线的导数, 因此, 对 I-V 特性曲线的光滑度要求较高。

### 3.3 滤波算法选取

朗缪尔探针的数据信号包含很多尖峰或突变部分, 并且噪声信号也不是平稳的白噪声。要将噪声消去, 提取有用的数据信号, 传统的傅里叶变换分析不能满足需求。而一般的均值滤波方法引起的信号失真率较高, 对原有信号的特征改变较大, 也不能满足应用需求<sup>[3]</sup>。

小波算法原理较复杂, 理解比较困难<sup>[4]</sup>。而 SG 滤波算法原理较简单, 可以根据数据信号的采样频率, 选择合适的曲线拟合点数和曲线次数, 拟合出的曲线逼近原始曲线, 噪声滤除得比较干净。目前, 国外已有研究者将 SG 滤波用于朗缪尔探针数据的分析, 并取得了较好的分析结果。

## 4 基于 SG 滤波算法的软件滤波

### 4.1 SG 滤波原理

SG 滤波算法的主要思想: 通过取点  $x_i$  附近固定个数的点拟合一个多项式, 多项式在  $x_i$  的值就给出了它的光滑数值  $g_i$  ( $g_i \in G$  矩阵)<sup>[5]</sup>。

以  $n_l$  表示  $x_i$  左边点的个数; 以  $n_r$  表示  $x_i$  右边的点的个数;  $p_i(x)$  表示相对于点  $x_i$  的一个  $M$  次多项式, 用它在最小二乘意义下拟合这  $n_l + n_r + 1$  个点。因此:

$$g_i = \sum_{k=0}^M b_k \left( \frac{x - x_i}{\Delta x} \right)^k \quad (5)$$

根据实测数据  $y_i$  拟合  $M$  次多项式  $p_i(x)$ , 可写成:

$$p_i(x) = \sum_{k=0}^M b_k \left( \frac{x - x_i}{\Delta x} \right)^k \quad (6)$$

假设横坐标  $x_i$  具有  $x_{i+1} - x_i \equiv \Delta x$  的均匀间距, 为在最小二乘意义下用  $p_i(x)$  拟合测试数据, 必须准确确定系数  $b_k$ ,

使得:

$$\min \sum_{j=i-n_l}^{i+n_r} [p_i(x_j) - y_j]^2 \quad (7)$$

分别定义矩阵  $A$ 、 $B$  和  $Y$ :

$$A = \begin{bmatrix} (-n_l)^M & \cdots & -n_l & 1 \\ -(n_l-1)^M & \cdots & -(n_l-1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ n_r^M & \cdots & n_r & 1 \end{bmatrix} \in R^{(n_l+n_r+1) \times (M+1)};$$

$$B = \begin{bmatrix} b_M \\ \vdots \\ b_1 \\ b_0 \end{bmatrix} \in R^{(M+1)}; Y = \begin{bmatrix} y_{j-n_l} \\ y_{j-n_l+1} \\ \vdots \\ y_j \\ \vdots \\ y_{j+n_r} \end{bmatrix} \in R^{(n_l+n_r+1)}$$

利用这些定义, 将式(7)重新表述成矩阵型:

$$\min \|AB - Y\|_2 \quad (8)$$

为使式(8)达到最优, 则  $AB = Y$ , 即:

$$A^T AB = A^T Y \quad (9)$$

由于  $A^T A$  是正定矩阵, 其逆矩阵存在, 由式(9)可知:

$$B = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (10)$$

因此, 得到矩阵  $\hat{Y} = A(A^T A)^{-1} A^T Y$ , 所求光滑数值  $G = A(A^T A)^{-1} A^T$ 。

### 4.2 SG 滤波算法的实现

本文应用 SG 滤波算法对原始数据进行滤波处理。图 3 是原始伏安特性曲线; 图 4 是采用不同  $n_l$ 、 $n_r$ 、 $M$  参数值的 SG 滤波后的伏安特性曲线。可以看出, 图 3 曲线过渡区域噪声较小, 饱和区域噪声较大; 图 4(a)曲线数据平滑性最好, 但过渡区域特性失真较严重; 图 4(b)曲线数据特性失真率较低, 但饱和区域平滑性相对较差。

通过滤波原理和实验结果, 均可得出  $n_l$  和  $n_r$  越大, 曲线的平滑性越好, 以牺牲曲线特性为代价; 相反,  $M$  的取值越大, 曲线特性失真率越低, 数据低频部分的平滑度越低, 计算量也越大<sup>[2]</sup>。

本文通过对多组实测数据进行多组不同滤波参数处理后综合比较, 针对伏安特性曲线的饱和区和过渡区分别选择 2 组滤波参数, 饱和区采用参数  $n_l = n_r = 20$ 、 $M = 1$ , 过渡区采用  $n_l = n_r = 5$ 、 $M = 3$ 。滤波后的曲线如图 5 所示, 可见该曲线过渡区数据失真较小, 饱和区曲线较平滑。

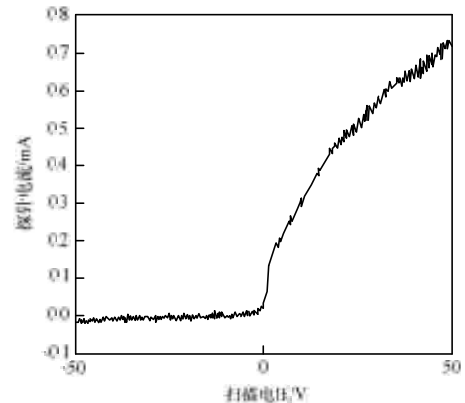
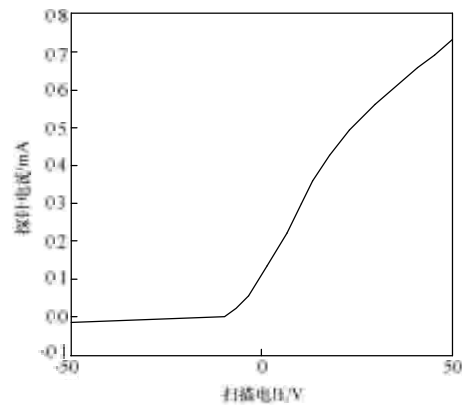
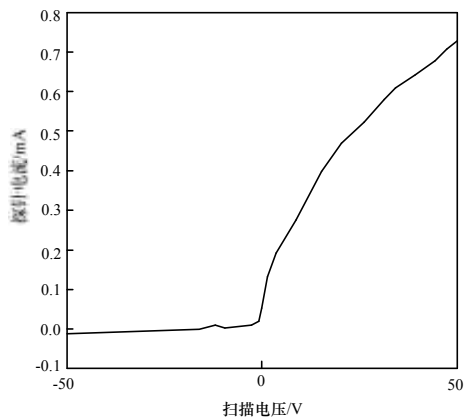


图3 原始伏安特性曲线



(a) $n_I=n_I, r=50, M=3$



(b) $n_I=n_I, r=5, M=3$

图 4 SG 滤波后的伏安特性曲线

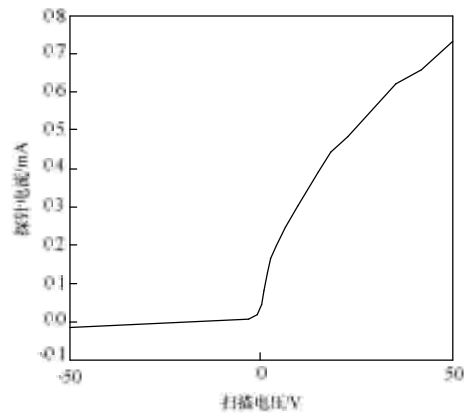


图 5 分段 SG 滤波后的伏安特性曲线

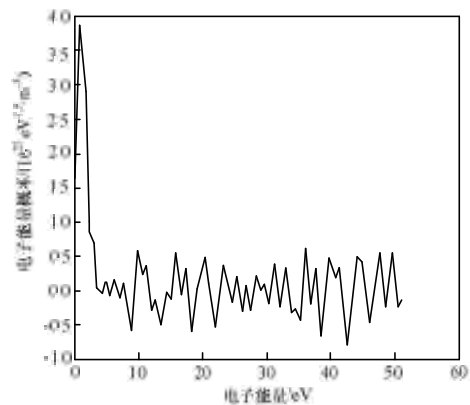
5 实验结果分析

本文采用最小平方误差法、相关系数、图像比较 3 种方式分析分段 SG 滤波的效果。由表 1 可知，分段 SG 滤波得到的方差比均值滤波和小波算法的方差都小，相关系数也比均值滤波和小波算法的高，由此可知，分段 SG 滤波效果较好。

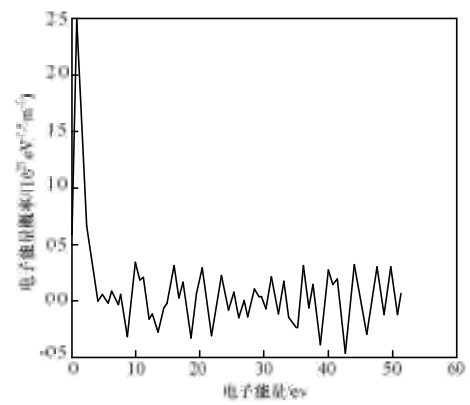
表 1 不同算法的方差和相关系数比较

算法	方差	相关系数
分段 SG 滤波	3.226 4e-007	0.999 99
均值滤波	0.016 001 0	0.754 30
小波变换	0.001 422 3	0.975 70

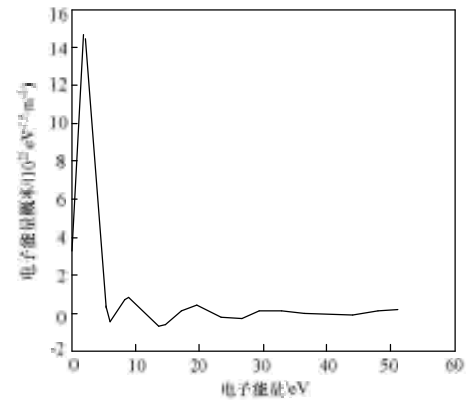
图 6 是伏安特性曲线的 EEPF 曲线比较。可见，图 6(b)曲线高能区波动仍然很大；图 6(c)曲线波峰幅值接近原始 EEPF 曲线波峰的 1/3，曲线特性改变较多；图 6(d)曲线高能区较平滑，且特性改变较少，准确度最高。



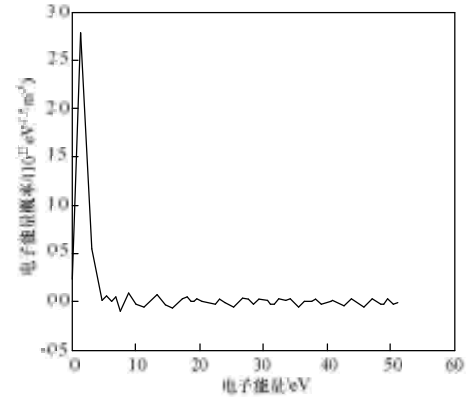
(a)原始 EEPF 曲线



(b)均值滤波后的 EEPF 曲线



(c)小波处理后的 EEPF 曲线



(d)分段 SG 滤波后的 EEPF 曲线

图 6 EEPF 曲线比较

6 结束语

本文介绍 SG 数字平滑滤波算法，并采用该算法分段对  
(下转第 226 页)