

## **ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ**

**В.И. Струнин**

профессор, д.ф.-м.н., e-mail: strunin@omsu.ru

**В.В. Шкуркин**

доцент, к.ф.-м.н., e-mail: zeya47@rambler.ru

**А.А. Ляхов**

ст. преподаватель, e-mail: lyahov@omsu.ru

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

**Аннотация.** Предложена автоматизированная система для проведения зондовых измерений в низкотемпературной плазме. Регистрация вольт-амперных характеристик производится с помощью универсальной платы сбора данных. Двукратное дифференцирование характеристик осуществляется с помощью программно реализованного цифрового фильтра. Приведён пример восстановления функции распределения по энергии из экспериментальной зондовой характеристики воздушной плазмы пониженного давления. Обсуждается влияние ширины окна цифрового фильтра на точность определения температуры электронов.

**Ключевые слова:** зонд Ленгмюра, фильтр Савицкого-Голея, дифференцирование экспериментальных зависимостей, автоматизация измерений.

### **Введение**

При изучении кинетики процессов, протекающих в химически активной плазме, которая используется для осаждения различных покрытий, большое значение имеет информация о параметрах электронной компоненты плазмы. Экспериментально эта информация может быть получена в результате применения различных методов диагностики плазмы. Одним из широко применяемых в настоящее время является метод электрических зондов [2].

Метод предложен и обоснован Ленгмюром и, несмотря на то, что это было сделано достаточно давно (1923 г.), метод не утратил своего значения до настоящего времени. Большим достоинством электрических зондов является возможность определения локальных значений параметров в точке, где находится зонд. Другим преимуществом зондовых методов является простота измерений, не требующих специальной сложной аппаратуры.

Результаты зондовых измерений — вольт-амперная характеристика (ВАХ), — зависимость тока на зонд от его потенциала относительно плазмы, а также её производные по потенциалу зонда при определённых условиях позволяют

определить такие параметры свободных электронов плазмы, как их плотность и энергетический спектр. Особенности применения зондов для диагностики электронной компоненты плазмы, а также методы обработки результатов измерения достаточно полно изложены в ряде работ [1–3].

Наиболее общий подход при анализе результатов зондовых измерений опирается на формулу Дрювестейна, связывающую вторую производную тормозящего участка ВАХ по потенциалу зонда с энергетическим спектром электронов плазмы [1]:

$$\frac{d^2i}{dV^2} = \frac{2\pi n_0 e^3}{m^2} f_0(eV),$$

где  $e$ ,  $m$  — электрический заряд и масса электрона соответственно,  $n_0$  — концентрация электронов,  $f_0$  — функция распределения электронов по скоростям.

В свою очередь, определить вторую производную ВАХ возможно как техническими, так и численными методами. В случае применения первых производится непосредственное дифференцирование характеристики зонда средствами аналоговой вычислительной техники на базе операционных усилителей, либо применением различных модуляционных методов.

Применение вторых связано с решением обратной задачи, которая, применительно к рассматриваемому случаю, является некорректно поставленной и для решения требует нетривиального алгоритма [4]. Альтернативой решению обратной задачи являются различные алгоритмы численного дифференцирования [5], в том числе с использованием методов цифровой обработки сигналов [7]. Все из перечисленных методов обладают определёнными достоинствами и недостатками.

Прямое дифференцирование ВАХ обладает низкой помехоустойчивостью и не обеспечивает приемлемой точности определения второй производной. Модуляционные методы требуют применения дополнительных технических средств, к которым предъявляются достаточно жёсткие требования при постановке эксперимента.

Применение численных методов для определения второй производной зондовой характеристики снижает требования к аппаратному оформлению эксперимента. В автоматизированной системе зондовой диагностики, которая предложена в данной работе, программное обеспечение регистрации ВАХ зонда дополнено процедурами цифровой фильтрации [8], с помощью которых выполняется дифференцирование результата измерений. При таком способе определения  $d^2i/dV^2$  затраты вычислительных ресурсов оказываются ниже, чем при восстановлении производной по методу решения обратной задачи.

## Состав комплекса

Структурная схема аналоговой части системы зондовой диагностики приведена на рис.1. Для регистрации ВАХ использована плавающая система, реализующая метод противозонда [1]. Для развёртки характеристики зонда

используется генератор развёртки ГР, являющийся, по сути, мощным операционным усилителем с выходным напряжением до 80 В. Дополнительный источник напряжения  $U_{см}$  обеспечивает поддержание системы электродов в области потенциала изолированного зонда. Ток, текущий в зондовой цепи после нормализации преобразователем ток-напряжение  $I \rightarrow U$  и ограничения спектра фильтром нижних частот ФНЧ, передаётся для измерения.

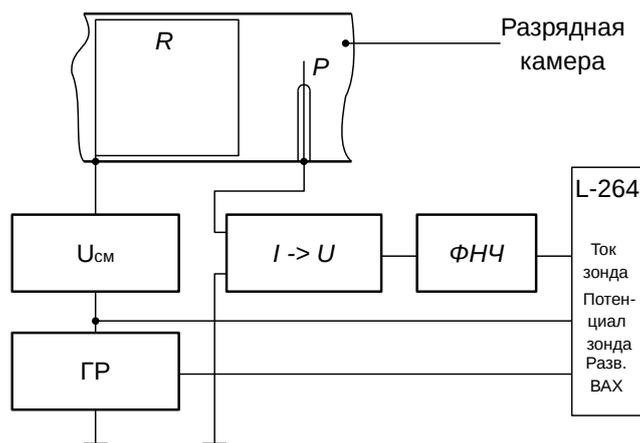


Рис. 1. Структурная схема системы зондовой диагностики.  $P$  — зонд Ленгмюра,  $R$  — опорный электрод, ГР — генератор развёртки,  $U_{см}$  — источник смещения,  $I \rightarrow U$  — преобразователь ток-напряжение, ФНЧ — фильтр нижних частот, L-264 — плата сбора данных с установленными АЦП и ЦАП

Управление компонентами аналоговой подсистемы, а также оцифровка аналоговых величин осуществляется персональным компьютером. В качестве интерфейса между компьютером и аналоговой частью системы используется карта сбора данных L-264 производства L-card [9], установленная в слот расширения системной магистрали компьютера. В состав карты входит 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), с помощью которого оцифровываются сигналы, соответствующие потенциалу и току зонда, а входящий в состав оборудования карты цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) используется для управления генератором развёртки.

Массивы оцифрованных данных в дальнейшем передаются процедурам, осуществляющих их обработку. В частности, двукратное дифференцирование зондовой характеристики выполняется подпрограммой, реализующей цифровой фильтр Савицкого-Голея [6].

## Результаты измерений

На рис. 2,а) приведены результаты регистрации вольт-амперной характеристики в плазме газового разряда в воздухе при давлении газа 0,64 Тор и токе разряда 80 мА. Эта ВАХ была использована для определения второй производной тока зонда по потенциалу с помощью фильтра Савицкого-Голея с различной полушириной окна  $m = 16, 20, 24$  (см. рис. 2,б) и рис. 3).

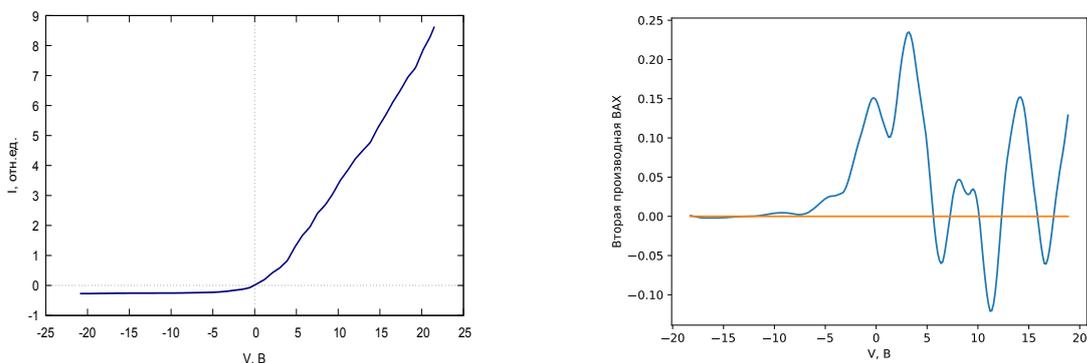


Рис. 2. а) вольт-амперная характеристика ленгмюровского зонда в плазме воздуха при давлении 0,64 Тор и токе разряда 80 мА; б) вторая производная, полученная цифровым фильтром с полушириной окна  $m=16$

На этих рисунках видно, что сглаженность второй производной улучшается с ростом полуширины окна.

Как известно [3], вторая производная зондового тока пересекает ось потенциалов в точке потенциала пространства  $V_s$ , т. е. энергетическому спектру электронов будет соответствовать участок второй производной от точки потенциала пространства в сторону отрицательных потенциалов (на рис.2,б) это участок левее точки  $V \approx 5$  В). В соответствии с этим область расположения функции распределения электронов определялась сдвигом нуля оси потенциала в точку потенциала пространства с последующей инверсией всех отрицательных значений потенциала.

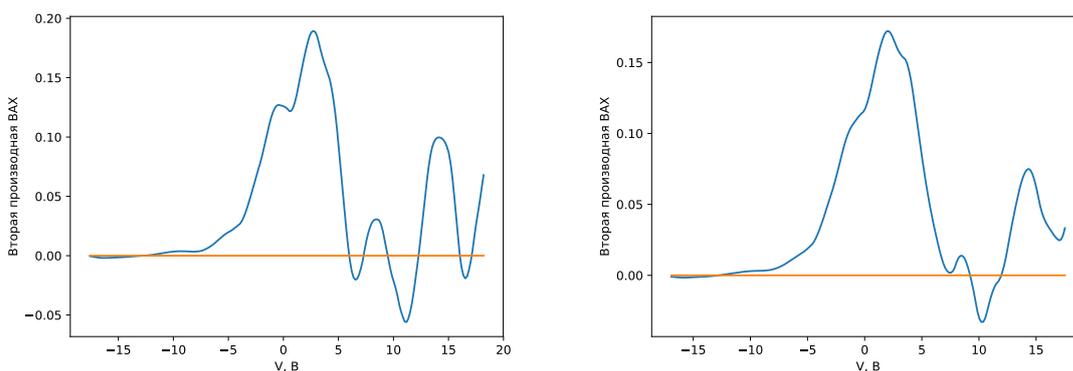


Рис. 3. Результат двукратного дифференцирования зондовой характеристики цифровым фильтром с параметрами а)  $m=2$ ; б)  $m=24$

Выделенные таким способом участки второй производной, соответствующие

энергетическому спектру электронов, нормировались с помощью выражения:

$$\int_0^{\infty} \varepsilon^{1/2} f(\varepsilon) d\varepsilon = A$$

и затем использовались для определения средней энергии электронов:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{A} \int_0^{\infty} \varepsilon^{3/2} f(\varepsilon) d\varepsilon,$$

где  $A$  — константа нормировки.

Значения  $\bar{\varepsilon}$ , соответствующие параметрам полуширины окна  $m=16, 20, 24$ , оказались равными 5,25; 5,67 и 6,64 эВ соответственно. Таким образом, увеличение полуширины окна сопровождается увеличением средней энергии электронов. Это можно объяснить «растягиванием» кривой второй производной по оси потенциала с ростом полуширины окна. В связи с этим возникает вопрос о выборе оптимального параметра окна  $m$ , что представляет собой отдельную задачу.

Разработанный комплекс позволяет проводить зондовые измерения в низкотемпературной плазме: осуществлять программное управление измерительной частью со стороны ПК, регистрировать вольт-амперные характеристики зондов Ленгмюра и выполнять их математическую обработку. Результаты, представленные в работе, демонстрируют возможность снижения трудоёмкости зондовой диагностики плазмы благодаря применению современных средств автоматизации и алгоритмов обработки измерительной информации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каган Ю.М., Перель В.И. Зондовые методы исследования плазмы // УФН 1963. Т. 81. С. 409–452.
2. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы / Демидов В.И. [и др.] М. : Энергоатомиздат, 1996. 240 с.
3. Новгородов М.З. Экспериментальное исследование электрических и оптических характеристик положительного столба тлеющего разряда в молекулярных газах // Труды ФИАН 1974. Т. 78. С. 60–116
4. Преображенский Н.Г., Пикалов В.В. Неустойчивые задачи диагностики плазмы. Новосибирск : Наука, 1982. 240 с.
5. Trunec D. The numerical differentiation of probe characteristics // Contrib. Plasma Phys. 1992. V. 32. P. 523–534.
6. Savitzky A., Golay M. Smoothing and differentiation of data by simplified leastsquares procedures // Anal. Chem. 1964. V.36. P. 1627–1639.
7. Fujita F., Yamazaki H. Determination of electron energy distribution function of plasma by digital processing from Langmuir probe characteristic // Jpn. J. Appl. Phys. 1990. V. 29. P. 2139–2144.

8. Ляхов А.А., Шкуркин В.В. Применение фильтров Савицкого–Голея для обработки вольтамперных характеристик зондов Ленгмюра // Вестник Омского университета 2012. Вып. 4. С. 72–76.
9. Официальный сайт фирмы L-card. URL: <http://lcard.ru>.

## SOFTWARE AND HARDWARE EQUIPMENT FOR PROBE DIAGNOSTICS OF LOW-TEMPERATURE PLASMAS

**V.I. Strunin**

Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, e-mail: [strunin@omsu.ru](mailto:strunin@omsu.ru)

**V.V. Shkurkin**

Ph.D. (Phys.-Math.), Associate Professor, e-mail: [zeya47@rambler.ru](mailto:zeya47@rambler.ru)

**A.A. Lyahov**

Assistant Professor, e-mail: [lyahov@omsu.ru](mailto:lyahov@omsu.ru)

Dostoevsky Omsk State University

**Abstract.** Automated system for probe measurements in low-temperature plasmas is considered. To acquire of current-voltage characteristics a multifunctional data-acquisition board is used. The double differentiation of characteristics is provided by the programmed digital filter. The test probe characteristic of air lower pressure plasma was obtained and the electron energy distribution function was recovered from it. The influence of filter's parameter on the accuracy of electron mean energy measurements is also discussed.

**Keywords:** Langmuir probe, Savitsky-Goley filter, differentiation of experimental curves, automated measurements.

*Дата поступления в редакцию: 23.11.2017*