

РАЗРАБОТКА ЗОНДОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ И РЕГИСТРАЦИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ЧАСТИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

© 2022 г. А. И. Сайфутдинов^{а,*}, С. С. Сысов^б

^а Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
Россия, 42011, Казань, ул. Карла Маркса, 10

^б Санкт-Петербургский государственный университет
Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

*e-mail: as.uav@bk.ru

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 22.08.2021 г.

Принята к публикации 06.09.2021 г.

Разработана на основе внешнего модуля а.ц.п./ц.а.п. (а.ц.п. — аналого-цифровой преобразователь, ц.а.п. — цифроаналоговый преобразователь) зондовая система, которая позволяет определять все основные параметры плазмы постоянных и импульсных газовых разрядов. Ее управление осуществляется в операционной среде Windows с помощью программы, разработанной на языке C++. Зондовая система может быть использована для диагностики плазменных устройств, а также быть составной частью современных микроплазменных анализаторов газовых смесей.

DOI: 10.31857/S0032816222010219

ВВЕДЕНИЕ

Локальная диагностика неравновесной газоразрядной плазмы, позволяющая определять потенциал плазмы, концентрацию электронов, их температуру, а также функцию распределения электронов, является важнейшим экспериментальным этапом физики плазмы [1–11]. Она позволяет судить о правильности понимания процессов, протекающих в газоразрядной плазме, и прогнозировать свойства разрабатываемых генераторов плазмы и приборов на ее основе. Наиболее простым и надежным инструментом локальной диагностики плазмы является зонд Ленгмюра, представляющий собой небольшой металлический электрод, погруженный в плазму [1–6]. Зонд соединяется с источником питания, позволяющим поддерживать на нем различные потенциалы, как положительные, так и отрицательные. Измеряя ток, идущий при этом на зонд, мы получаем так называемую зондовую характеристику, дающую сведения о параметрах плазмы [1–6].

Необходимо отметить, что идеи зондовой диагностики плазмы, а именно измерение высокоэнергетической части нелокальной функции распределения в плазменной области отрицательного свечения тлеющего разряда в буферном инертном газе с примесями, нашли применение и в основе разработки микроплазменных анализаторов газовых смесей [11–14].

На сегодняшний день существуют различные коммерческие зондовые системы, например система MFPA фирмы Plasma Sensors [15, 16], система Impedans [17] одноименной фирмы или система Hiden ESPION фирмы Hiden Analytical Ltd [18]. Они позволяют в режиме реального времени измерять зондовые характеристики и определять из них все основные параметры плазмы. Отметим, что системы Impedans и ESPION чувствительны к шумам при определении высокоэнергетической части функции распределения электронов (ф.р.э.), что требует изготовления специальных фильтров, усилителей при комплексной диагностике газоразрядной плазмы [15, 19]. Кроме того, главным минусом всех вышеперечисленных систем являются чрезвычайно дороговизна и достаточно большие размеры, что исключает возможность их использования в качестве составных частей в микроплазменных газоанализаторах [10–14].

В связи с вышесказанным в работе была поставлена следующая цель — разработать компактную зондовую систему, позволяющую измерять зондовые характеристики и определять основные параметры плазмы, включая ф.р.э., в постоянных и импульсных газовых разрядах.

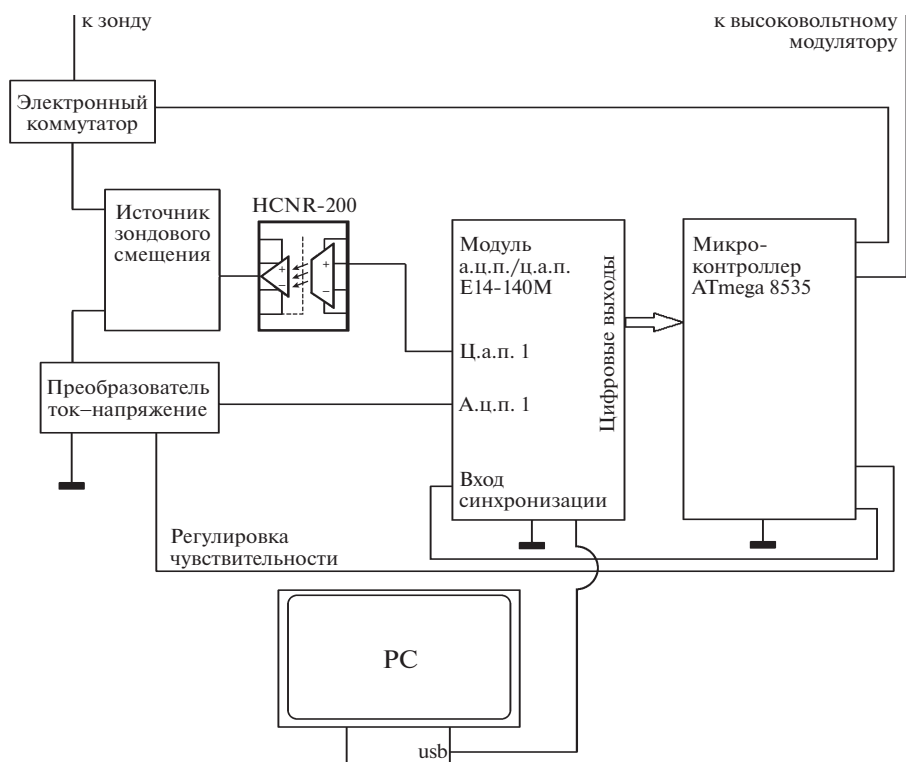


Рис. 1. Блок-схема зондовой системы диагностики.

ОПИСАНИЕ ЗОНДОВОЙ СИСТЕМЫ

Зондовая система регистрации была разработана на основе внешнего модуля а.ц.п./ц.а.п. E14-140M компании L-CARD (а.ц.п. – аналого-цифровой преобразователь, ц.а.п. – цифроаналоговый преобразователь). Основные параметры этого модуля: а.ц.п. 14 бит до 200 кГц, 16/32 канала коммутации, поддиапазоны ± 10 В, ± 2.5 В, ± 0.6 В, ± 0.15 В для асинхронного и синхронного режимов сбора данных; ц.а.п. 16 бит, 2 канала ± 5 В, до ± 10 мА, до 200 кГц по каждому каналу; обеспечивается непрерывный сбор–выдача аналоговых данных а.ц.п.–ц.а.п.; асинхронный цифровой ввод 16 бит, вывод 16 бит данных. Блок-схема зондовой системы изображена на рис. 1. Источник зондового смещения использовал батарейное питание, гальваническая развязка осуществлялась посредством аналогового оптрона с высокой линейностью HCNR-200, на который напряжение поступало с одного из ц.а.п. Зондовый ток преобразовывался в напряжение с помощью операционного усилителя, чувствительность могла меняться программным образом во время измерений. Полученное напряжение поступало на вход одного из каналов а.ц.п.

Для работы в стационарном режиме в управляющей программе был использован метод накопления сигнала. Для этого в управляющем окне можно было установить время интегрирования.

Все зондовые характеристики, измеренные во время интегрирования, усреднялись для получения одной результирующей зондовой вольт-амперной характеристики.

Для работы в импульсном режиме в схеме был задействован микроконтроллер ATmega 8535. Он задавал период импульсного разряда, длительность активной фазы, время открытия электронного коммутатора и время измерения в нужной фазе послесвечения. Все эти параметры устанавливались с персонального компьютера через цифровые выходы E14-140M.

Модуль E14-140M подключался к персональному компьютеру через USB-порт. Для данной системы регистрации была написана управляющая программа для операционной системы Windows на языке Си++. Она позволяла задавать параметры зондовой схемы и отображать вольт-амперную характеристику (в.а.х.), первую и вторую производные во время измерений и записывать результаты в текстовый файл. Первая и вторая производные определялись с помощью численного дифференцирования.

Разработанная программа позволяла определять все основные параметры плазмы. Так, на рис. 2 представлено окно управляющей программы, в режиме измерения в.а.х., ее первой и второй производной в плазме положительного столба тлеющего разряда в гелии в режиме послесвече-

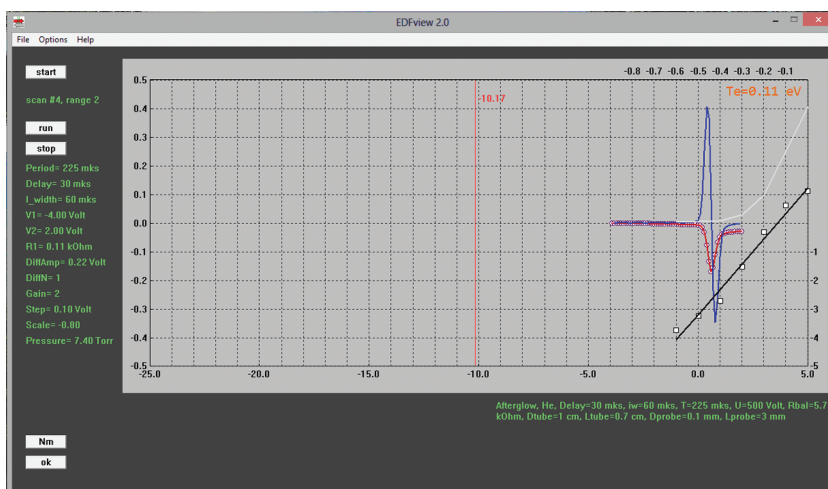
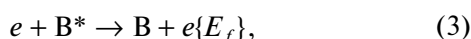
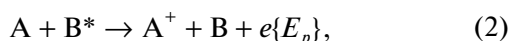


Рис. 2. Окно управляющей программы, показывающее нахождение температуры электронов во время измерений.

ния. Представлено нахождение температуры электронов, которая определялась по линейному участку зависимости логарифма первой производной зондового тока от потенциала зонда по формуле [1–5]

$$T_e = \left| \frac{e \Delta U}{k \Delta(\ln i')} \right|. \quad (1)$$

В случае измерения высокоэнергетичной части ф.р.э. в плазме послесвечения, а также в стационарной плазме отрицательного свечения тлеющего разряда в чистых инертных газах или с примесями возможно формирование узких пиков (максимумов) от электронов, рожденных в реакциях пеннинговской ионизации и ударов второго рода с участием метастабильных атомов инертного газа [1, 10]:



где E_p и E_f – энергии рождения быстрых электронов.

Если рождающиеся в этих реакциях быстрые электроны не успевают изменить свою энергию за счет электрон-атомных и электрон-электронных столкновений и уходят на стенки в режиме свободной диффузии [20], то количество быстрых электронов, которое можно получить интегрированием ф.р.э., можно легко связать с концентрацией метастабильных атомов. Характерное время свободной диффузии электронов в случае цилиндрической геометрии разрядной трубки определяется выражением

$$\tau_{df}^{-1} = D_e \left(\left(\frac{2.4}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \right), \quad (4)$$

где D_e – коэффициент диффузии, R – радиус трубки, L – длина трубки. Для оценки концентрации метастабильных атомов можно воспользоваться результатами интегрирования кинетического уравнения для изотропной части ф.р.э. [1, 10]:

$$S_e(0) = 0.78 k_{im} N_j(0) N_m(0) \tau_{df}, \quad (5)$$

где $N_j(0)$ и $N_m(0)$ – концентрации участвующих в реакции частиц в центре разрядной трубки, $S_e(0)$ – концентрация быстрых электронов, k_{im} – константа скорости данной реакции. Экспериментально ф.р.э. можно определить с помощью формулы Дривестейна, которую удобно записать в виде [1–4]

$$f_e(\epsilon) = \frac{2\sqrt{2}}{S e^2} \sqrt{\frac{m}{e}} \sqrt{U} \frac{d^2 i_e}{dU^2}. \quad (6)$$

В данном выражении i_e – электронный ток на зонд, U – потенциал зонда относительно потенциала плазмы, S – площадь зонда, $f_e(\epsilon)$ нормирована на концентрацию электронов. Таким образом, измерив ф.р.э., можно найти концентрацию метастабильных атомов и концентрацию электронов. Управляющая программа позволяет осуществлять данный расчет автоматически во время эксперимента, что иллюстрирует рис. 3.

На рис. 3 отображаются результаты регистрации пиков на высокоэнергетичной части ф.р.э. в тлеющем разряде в гелии при давлении 4.8 Торр, разрядном токе 8 мА, а также вычисленные значения концентрации метастабильных атомов гелия и концентрации электронов.

Далее приведем результаты сравнения вторых производных зондовых в.а.х., полученных в результате измерений, выполненных с помощью разработанной зондовой системы и системы MFPA фирмы Plasma Sensors [14, 15]. Так, на рис. 4 пред-

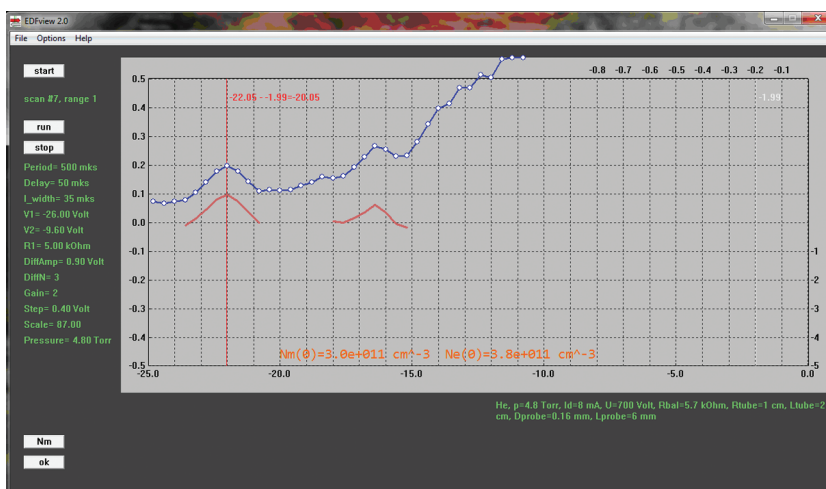


Рис. 3. Окно управляющей программы, иллюстрирующее нахождение концентрации электронов и метастабильных атомов гелия.

ставлены зондовые в.а.х. и их вторые производные, полученные численным методом с помощью двух зондовых систем в тлеющем разряде в гелии с примесями воздуха.

В обоих случаях зарегистрированы пики от быстрых электронов на высокоэнергетичной части ф.р.э. Так, наблюдаются пики в диапазоне 19.8–20 эВ, что соответствует электронам, возникающим в суперупругих реакциях:

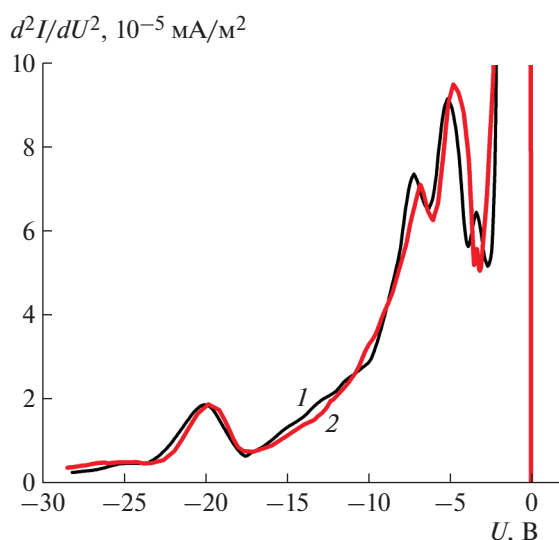
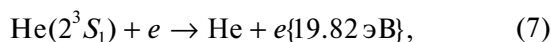
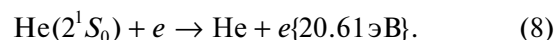
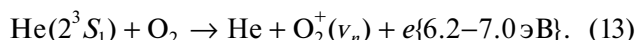
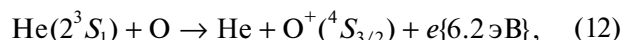
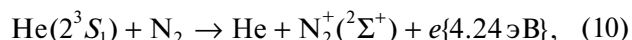
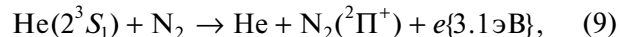


Рис. 4. Сравнительный анализ вторых производных зондовых в.а.х., полученных в результате измерения на разработанной зондовой системе (1) и на коммерческой зондовой системе MFPA (2) в плазме отрицательного свечения тлеющего разряда в гелии при давлении 4 Торр и разрядном токе 2 мА.



Кроме того, в обоих случаях хорошо выражены пики в областях 3.1 эВ, 4.2 эВ и 6.2 эВ. Они связаны с электронами, образующимися в реакциях пеннинговской ионизации молекул примеси метастабильными атомами гелия [13]:



Видно, что результаты практически совпадают, что свидетельствует о надежности разработанной зондовой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработана и реализована зондовая система, позволяющая в автоматическом режиме измерять все основные параметры плазмы, концентрации заряженных частиц, температуру электронов, а также ф.р.э. и по своей функциональности не уступающая коммерческим аналогам. При этом зондовая система является компактной, что важно для создания миниатюрных микроплазменных газоаналитических систем на ее основе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ № СП-239.2021.1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидов В.И., Колоколов Н.Б., Кудрявцев А.А. Зондовые методы исследования низкотемпературной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1996.
2. Иванов Ю.А., Лебедев Ю.А., Полак Л.С. Методы контактной диагностики в неравновесной плазменной химии. М.: Наука, 1981.
3. Каган Ю.М., Перель В.И. // УФН. 1973. Т. 81. С. 409.
4. Чен Ф. Электрические зонды // Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
5. Лебедев Ю.А. Введение в зондовую диагностику плазмы пониженного давления. М.: МИФИ, 2003.
6. Chen F.F. Langmuir probe analysis for high density plasmas. University of California, Los Angeles, LTP-006. 2000.
7. Горшунов Н.М., Потанин Е.П. // ПТЭ. 2018. № 4. С. 75. <https://doi.org/10.1134/S0032816218040067>
8. Кожухов С.А., Иванов В.Н., Шапошников А.Н., Котельников Д.В., Балугин Н.В., Перемежко Т.М. // ПТЭ. 2017. № 4. С. 130. <https://doi.org/10.7868/S0032816217030211>
9. Yuan C., Kudryavtsev A.A., Saifutdinov A.I., Sysoev S.S., Yao J., Zhou Zh. // Plasma Sources Science and Technology. 2019. V. 28 (6). P. 067001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ab2401>
10. Руденко К.В., Мяконьких А.В., Орликовский А.А. // Микроэлектроника. 2007. Т. 36. № 3. С. 206.
11. Колоколов Н.Б., Благоев А.Б. // УФН. 1993. Т. 163. С. 55. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0163.199303c.0055>
12. Kudryavtsev A., Pramatarov P., Stefanova M., Khromov N. // JINST. 2012. V. 7. P. 07002. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/07/P07002>
13. Yuan C., Kudryavtsev A.A., Saifutdinov A.I., Sysoev S.S., Stefanova M.S., Pramatarov P.M., Zhou Z. // Physics of Plasmas. 2018. V. 25. P. 104501. <https://doi.org/10.1063/1.5026214>
14. Saifutdinov A.I., Sysoev S.S. // Plasma Sources Science and Technology. 2021. V. 30 (1). P. 017001. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/abd61d>
15. Godyak V.A., Alexandrovich B.M. // J. Appl. Phys. 2015. V. 118. P. 233302. <https://doi.org/10.1063/1.4937446>
16. <http://www.plasmasensors.com/products.html#mfpa>
17. Impedans Langmuir Probe Measurement System, Exploitation Manual, accessed on Aug. 26, 2016.
18. hidenanalytical.com/wp-content/uploads/2020/05/ESPion-pdf.pdf
19. Рябый В.А., Обухов В.А. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 46.
20. Tsendin L.D. // Plasma Sources Science and Technology. 1995. V. 4. P. 200. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/4/2/004>