

**Физический  
ИНСТИТУТ**



*имени  
П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

ПРЕПРИНТ

**14**

С.Н. АНДРЕЕВ, А.В. БЕРНАЦКИЙ, А.С. КОСТЕНКО,  
В.В. ЛАГУНОВ, С.Н. ЦХАЙ, А.Н. ЯЦКЕВИЧ

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СХЕМА  
ИЗМЕРЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ  
ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ  
В ПЛАЗМЕ ПОЛОГО КАТОДА  
И КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ**

Москва — 2015

# ПРЕПРИНТЫ ФИАН им. П. Н. ЛЕБЕДЕВА

ISSN 2410-4914

**Главный редактор** В. И. Ритус, *зам. главного редактора* А. А. Гиппиус,  
*научный секретарь* С. А. Богачев, *ответственный секретарь* Л. В. Селезнев

**Редакционная коллегия:** В. С. Бескин, А. А. Горбацевич, О. Д. Далькаров,  
Е. И. Демихов, И. Г. Зубарев, К. П. Зыбин, А. А. Ионин, Н. Н. Колачевский,  
Е. Р. Корешева, С. Ф. Лихачев, А. С. Насибов, И. Д. Новиков, В. Н. Очкин,  
Н. Г. Полухина, В. С. Лебедев, Н. Н. Сибельдин, Д. Р. Хохлов, С. А. Чайковский

## Информация

Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева издаются с 1964 г.

**Издатель:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

**Адрес редакции:** Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53, ФИАН

Тел.: +7 (499) 132-6137, +7 (499) 783-3640;

E-mail: [preprins@sci.lebedev.ru](mailto:preprins@sci.lebedev.ru), [irinakh@sci.lebedev.ru](mailto:irinakh@sci.lebedev.ru)

Страница сборника «Препринты ФИАН им. П. Н. Лебедева» в интернете:

<http://preprints.lebedev.ru/>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА

С.Н. Андреев, А.В. Бернацкий, А.С. Костенко, В.В. Лагунов,  
С.Н. Цхай, А.Н. Яцкевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ ПО ЭНЕРГИЯМ В ПЛАЗМЕ  
ПОЛОГО КАТОДА И КОМПЛЕКСНОЙ ПЛАЗМЕ**

**№ 14**

Москва 2015

# Автоматизированная схема измерений распределений электронов по энергиям в плазме полого катода и комплексной плазме

С.Н. Андреев, А.В. Бернацкий, А.С. Костенко, В.В. Лагунов, С.Н. Цхай,  
А.Н. Яцкевич

[andreev@sci.lebedev.ru](mailto:andreev@sci.lebedev.ru) , [berav@sci.lebedev.ru](mailto:berav@sci.lebedev.ru) , [tskhai@sci.lebedev.ru](mailto:tskhai@sci.lebedev.ru)

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н.Лебедева Российской академии наук

## *1. Введение*

Проблема обнаружения микротечей в электроразрядных камерах больших объемов сложных технических устройств остается одной из серьезных задач, не имеющей пока эффективного решения [1, 2, 3]. Для камер с большим энерговыделением (реакторы, например) обычно используется охлаждение стенок водой и контроль за содержанием паров воды в плазме весьма критичен. В [2] предлагалось для контроля концентрации воды в плазме использовать излучение гидроксила  $\text{OH}(A^2\Sigma-X^2\Pi)$  в области 306-309 нм. Методика основывалась на предположении, что спектральные линии с высокими вращательными квантовыми числами в так называемой "горячей" группе появляются в результате реакции диссоциативного возбуждения. Используя известное из литературы сечение диссоциативного возбуждения [4], измеренные зондовым методом концентрации электронов и их распределения по скоростям в [3] достигнута чувствительность измерения изменений концентрации паров воды  $2,65 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  в секунду. В то же время в [3] отмечалось, что в процессе эксперимента концентрация воды значительно менялась. Результаты измерений получались через  $\sim 100$  с после включения разряда, когда изменения концентраций были уже достаточно большими. В последующие 15 минут концентрация падала еще более чем в 2 раза. Одновременно с этим отмечался и «дрейф» средней энергии электронов. Запись спектра 0-0 полосы перехода  $\text{OH}(A^2\Sigma-X^2\Pi)$  занимала  $\sim 40$ с при сканировании решетки монохроматора МДР-204 с регистрацией ФЭУ. В относительных интенсивностях линий во

вращательной структуре спектра (температура горячей группы) со временем сильных изменений не наблюдалось, что позволяло контролировать концентрацию молекул воды в ходе эксперимента только по одной выделенной линии колебательно-вращательного перехода, для чего требуется также знание концентрации и вида функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ). С использованием ПЗС линейки весь спектр мог записываться за время  $\sim 0,1$  с, тогда как регистрация же вольт-амперной характеристики (ВАХ) зонда занимает время не менее нескольких минут при приемлемой статистике, что затрудняет совокупную спектральную и электронную онлайн диагностику. Наиболее медленной процедурой оказывается измерения параметров электронной компоненты плазмы, если её проводить с помощью стандартных аналоговых процедур [5].

Другим объектом, представляющим интерес, с точки зрения быстрой регистрации зондовой характеристики, является комплексная (пылевая) плазма, в том числе и в упоминаемых выше установках [6]. Исследованиям пылевой плазмы посвящено большое число публикаций (см., например [7, 8]), однако преимущественно они носят теоретический характер, включая расчеты ФРЭЭ. Применение традиционной зондовой методики в этом случае осложняется тем, что заряженная пыль прилипает к зонду и, таким образом, меняет его характеристики, создавая диэлектрическую пленку на поверхности.

В представленной работе описывается автоматизированная схема регистрации зондовой ВАХ и определения ФРЭЭ в режиме реального времени. Проведены измерения ФРЭЭ на установке "Течь" в полном катоде и в стратифицированном тлеющем разряде с макрочастицами  $Al_2O_3$ .

## *2. Экспериментальная установка с полым катодом и алгоритм измерения ФРЭЭ по ВАХ зонда.*

Подробное описание разрядной камеры, вакуумной системы и спектральная аппаратура приведены в [2, 3]. В вакуумной (остаточное давление  $\sim 3 \cdot 10^{-5}$  мбар) камере объемом 30 л располагался полый катод размером  $10 \times 5 \times 1$  см<sup>3</sup>. В качестве анода применялась вольфрамовая проволока диаметром 1,5 мм

натянутая параллельно длинной открытой стороне прямоугольного катода на расстоянии 15 мм от него. Электрический зонд в виде вольфрамовой проволоки диаметром 0,08 мм, помещенный в керамическую трубку мог вводиться плазму на различных расстояниях от электродов.

Аппаратная блок-схема автоматического сбора и обработки ВАХ электрического зонда в плазме представлена на рис. 1.

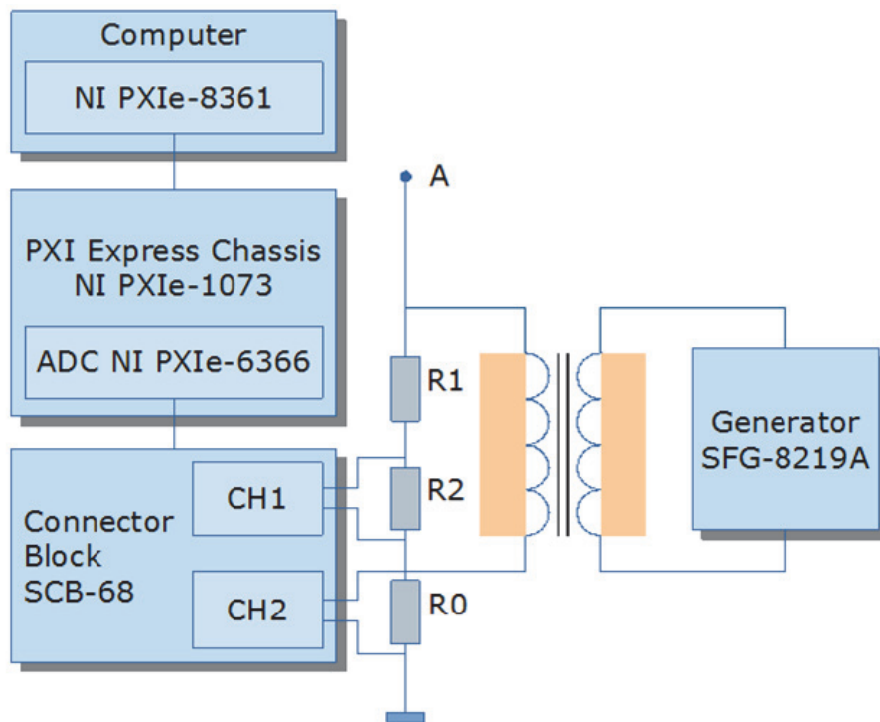


Рис. 1. Схема автоматической регистрации зондовой характеристики.

Напряжение смещения  $\pm 110$  В на зонд А подавалось в частотном режиме с генератора SFG-8219A ( $\sim 500$  Гц) через повышающий трансформатор и регистрировалось в первом канале CH1 с делителя напряжения  $R1=339$  кОм,  $R2=15,5$  кОм. Зондовый ток с нагрузочного сопротивления  $R0=490$  Ом поступал через второй канал CH2. Далее с экранированного соединительного блока ввода/вывода NI SCB-68 обе характеристики поступали на плату аналого-цифрового преобразователя (АЦП) NI PXIe-6366 (8 каналов, 2МВыборки/с на канал, разрешение - 16 бит). Плата АЦП находится в PXIe модуле NI PXIe-1073, соединенным цифровым кабелем с интерфейсной платой NI PCIe-8361, установленной в компьютере. Для обработки ВАХ зонда была создана

специальная программа в NI LabView, позволяющая в режиме реального времени вычислять функцию распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) по второй производной ВАХ зонда [5].

Блок-схема программы обработки ВАХ представлена на рис. 2.

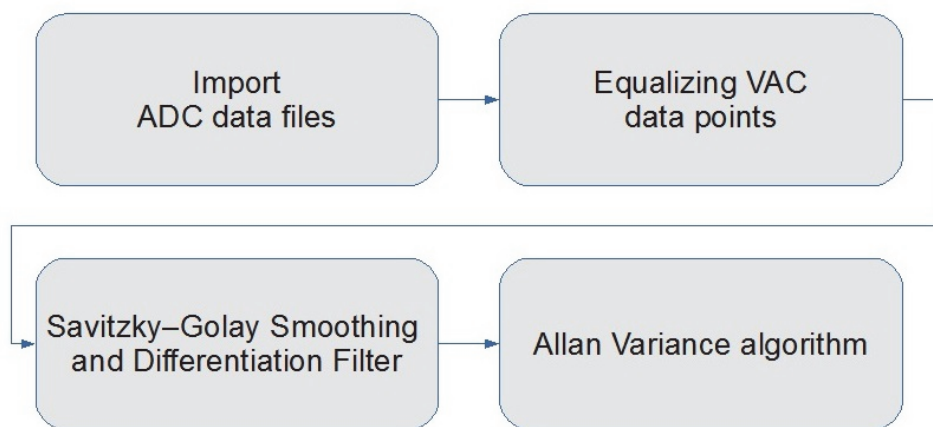


Рис. 2. Блок-схема программы обработки ВАХ.

Флуктуации регистрируемых сигналов напряжения и тока ВАХ затрудняют прямое численное дифференцирование. Поэтому на первом шаге обработки проводилась аппроксимация ВАХ. Для этого вся характеристика разбивалась на эквидистантные по напряжению участки ( $\Delta V=0,5$  В), в которых определялось среднее значение тока по этому участку. Для получения ФРЭЭ построенная таким образом кривая дважды дифференцировалась с применением фильтрации Савицкого-Голая [9]. Определялось напряжение смещения, при котором находится максимум второй производной и ее нулевое значение (потенциал плазмы). Для исключения случайных результатов, возникающих на флуктуациях ВАХ, задавался вероятностный интервал этих значений.

ФРЭЭ выводилась графически в каждом цикле сканирования напряжения смещения. По произвольно выбранному числу повторяющихся циклов выводилась среднее ФРЭЭ. Кроме того, в каждом цикле сканирования напряжения выводилась величина средней энергии и график ее поведения по времени (числу циклов). Эти результаты выводились также в виде графика дисперсии Аллана для контроля стабильности параметров плазмы и регистрирующей системы в течении времени измерений.

### 3. Результаты измерений ФРЭЭ в плазме полого катода

Апробация, созданной автоматической системы проводилась в разряде в полом катоде в чистом гелии на установке, описанной в [3]. На рис. 3 приведена ФРЭЭ, усредненная по 128 измерениям ВАХ (44 секунды по времени) при частоте повторения сканирования напряжения смещения 490 Гц. Условия проведения эксперимента соответствовали [3]: давление He 1 мбар, ток разряда 0,23 А.

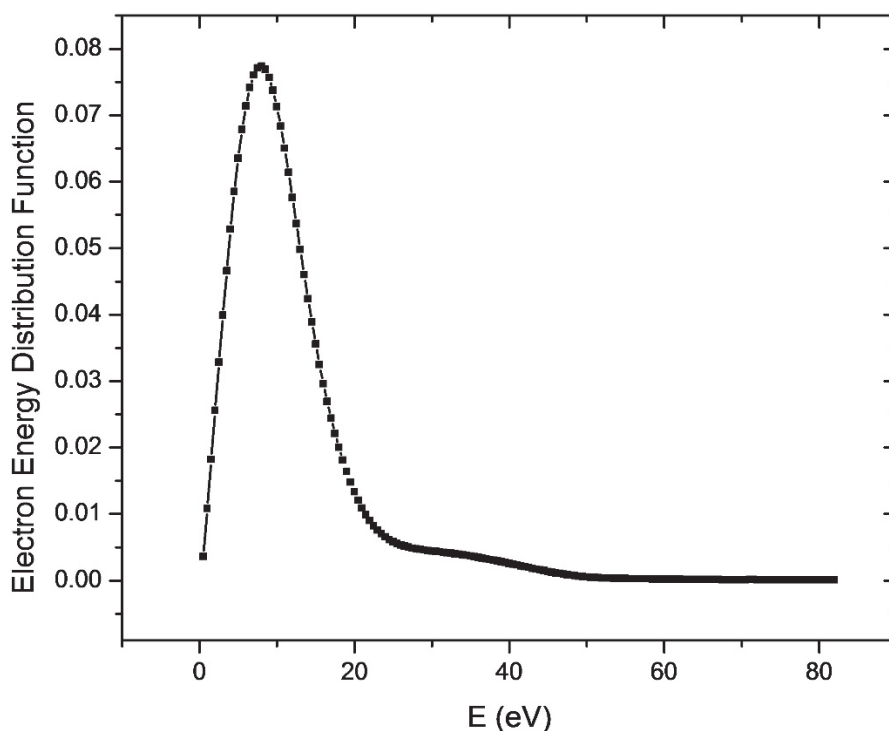


Рис. 3. ФРЭЭ в разряде в 1 мбар He в полом катоде при токе 0,23 А.

Анализ устойчивости измеряемых параметров плазмы и измерительной системы проводился по методу дисперсии Аллана. Для представленного эксперимента график Аллана показан на рис. 4. Характерное поведение дисперсии Аллана в течении 10-15 с соответствовало поведению дисперсии нормального шума. При больших временах, как правило, наблюдалось отклонение экспериментальной кривой от нормального шума (прямая на графике), что, по-видимому, связано с дрейфом параметров плазмы. Значение средней температуры электронов, измеренной за время  $\sim(1-2)$  с составляет  $T_e=7,6\pm 0,05$ эВ. Это значение хорошо совпадает с данными, полученными в



измерениях, проведенных по стандартной методике, требующей времени усреднения результатов ~1 минуты [3].

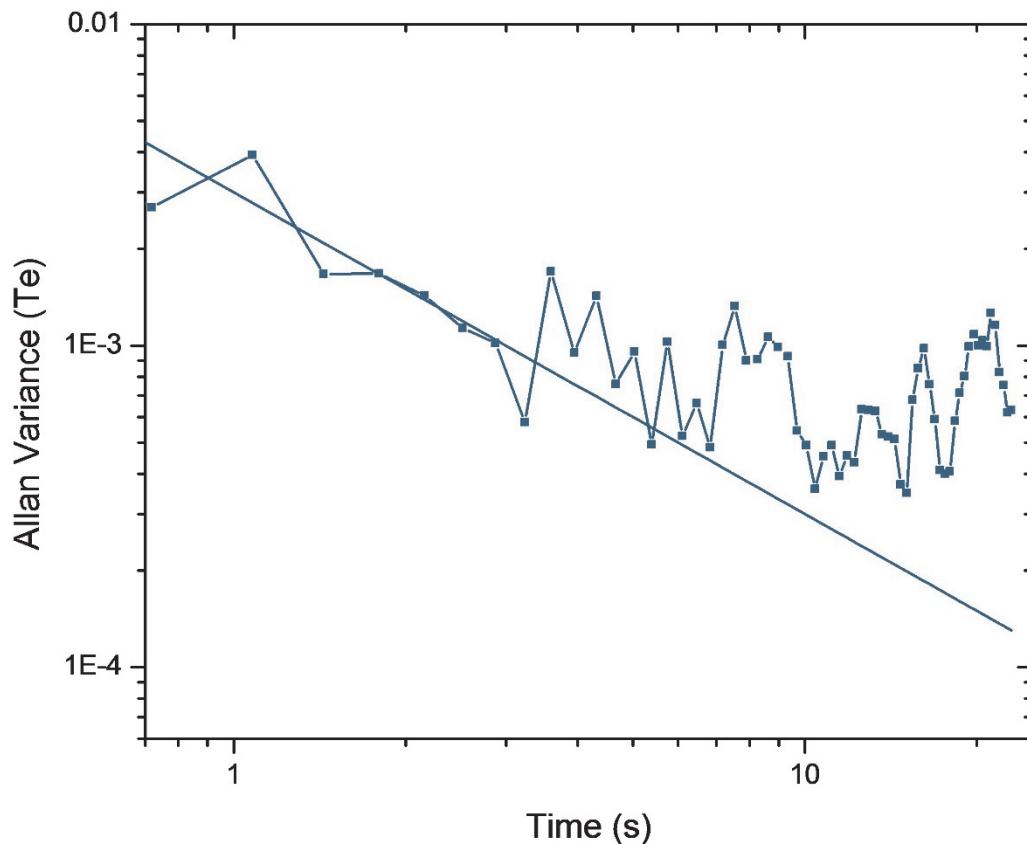


Рис. 4. График дисперсии Аллана.

#### 4. Измерения ФРЭЭ в пылевой плазме

По нашим представлениям существует относительно малое число экспериментальных работ, посвященных измерению ФРЭЭ в пылевой плазме. В [10] использовался зонд с электромагнитным приводом и специальным экраном, позволяющим экспонировать его в плазме высокочастотного разряда в течение меньше 6 с. В [11] обсуждается формирование пустого (от частиц) пространства при отрицательном напряжении смещения на зонде и возможности регистрации ФРЭЭ.

Другой подход для уменьшения запыленности зонда применялся в [12], где использовалась быстрое сканирование напряжения смещения с автоматической очисткой за счет большого напряжения смещения положительного или отрицательного за время ~ мс. Отмечалось, что при

высоком отрицательном напряжении (очистка бомбардировкой поверхности ионами) возможно распыление зонда особенно в плотной плазме, поэтому напряжение выбиралось 50-100 В относительно потенциала плазмы.

Частоту колебаний пылевых частиц можно вычислить [13]

$$\omega = \sqrt{(Z^2 e^2 n_d) / (\epsilon_0 m)},$$

где  $Z$ ,  $m$ ,  $n_d$  – заряд, масса и плотность пылевых частиц,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная. Для условий проведения наших экспериментов с пылевыми частицами  $Al_2O_3$  диаметром 2-10 мкм, оценка частоты показывает, что она не превышает нескольких десятков Гц. Поэтому при сканировании напряжения смещения на зонде с частотой несколько сотен Гц можно ожидать, что отрицательно заряженные пылевые частицы не будут успевать прилипнуть к поверхности зонда.

Исследовался тлеющий разряд в вертикальной кварцевой трубке диаметром 34 мм в газовой смеси Ar-He (1:1) при давлениях 0,1-0,7 Торр. Ток разряда поддерживался высоковольтным источником ИЛГН-704 1-5 мА. Разряд стратифицированный с расстоянием между стратами ~ 3 см. Наблюдение за пылевыми частицами осуществлялось по рассеянному лазерному излучению (430 нм) с помощью микроскопа USB 50X-500X. На зонд диаметром 80 мкм подавалось дополнительное отрицательное смещение ~ 300 В, при потенциале плазмы -220-250 В.

На рис. 5 представлены ФРЭЭ полученные в плазме тлеющего разряда при токе 1 мА, давлении Ar-He(1:1) 0,7 Торр и частоте сканирования напряжения смещения 490 Гц. Сплошная кривая соответствует разряду без пыли, штриховая – в присутствии полидисперсных пылевых частиц  $Al_2O_3$  диаметром 2-10 мкм.

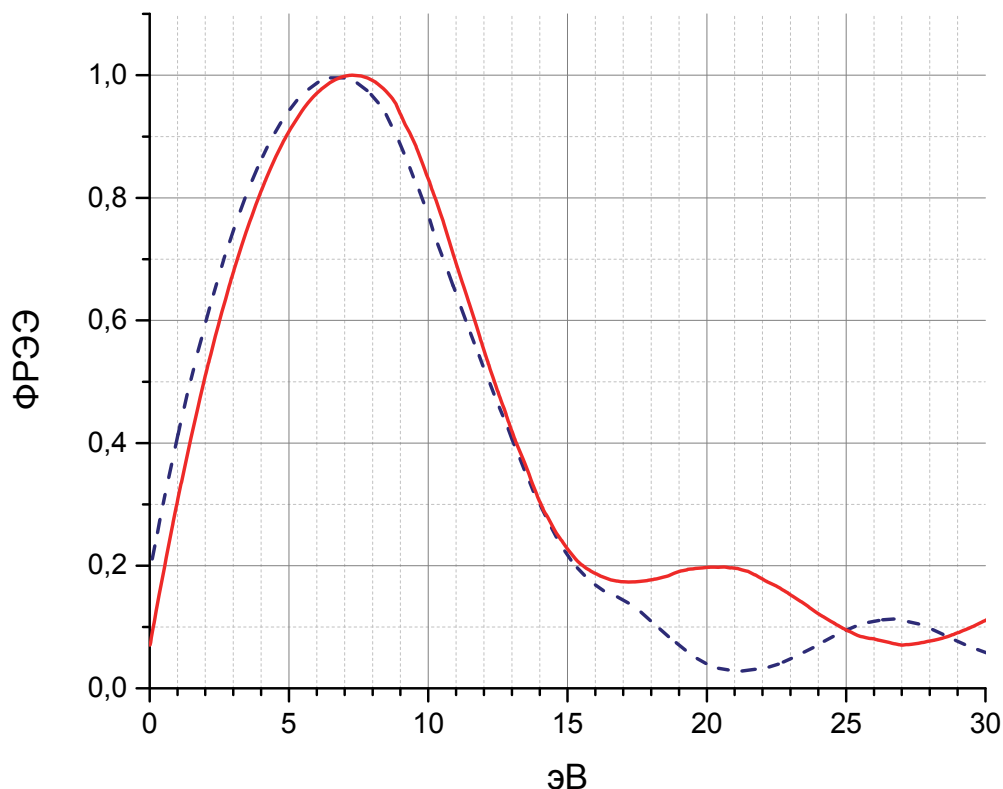


Рис. 5. ФРЭЭ в тлеющем разряде Ar-He (1:1), давление 0,7 Торр, ток 1мА (сплошная кривая) и в разряде при тех же условиях, но при наличии пыли (штриховая кривая).

Из рис. 5 видно, что в пределах погрешности эксперимента ФРЭЭ в разряде с пылевыми частицами и без них в области энергий менее 15эВ совпадают и влияние заряженных пылевых частиц не сказывается. При введении отрицательного зонда в пылевую структуру действительно наблюдалось сильное отталкивание пылевых частиц от зонда, что является следствием их большого отрицательного заряда. При определенных условиях (достаточное количество частиц, небольшой отрицательный потенциал зонда) частицы располагались вокруг зонда не некотором от него расстоянии, оставляя при этом свободной прилегающую к зонду область. Эта область имела четкую границу в форме сферы.

## *5. Заключение*

Созданная система автоматической регистрации и обработки зондовых характеристик позволяет в режиме реального времени измерять ФРЭЭ в газоразрядной плазме, а также получать усредненные характеристики по заданному периоду времени.

Результаты применения системы к плазме полого катода в He при давлении 1 мбар демонстрируют хорошее совпадение с ранними экспериментами [3] и определяли температуру распределения электронов  $7,6 \pm 0,05$  эВ.

Поведение графика дисперсии Аллана в пределах 10-15 с близко к поведению нормальных шумов. При большем времени усреднения наблюдаются отклонения, связанные, по-видимому, с дрейфом плазменных параметров. Таким образом, время, оптимальное с точки зрения погрешности измерений электронной компоненты плазмы, составляет несколько секунд.

В пылевой плазме стратифицированного тлеющего разряда в смеси Ar-He измеренные ФРЭЭ с пылевыми частицами и без них практически совпадают.

Работа выполнена при поддержке гранта 14-12-00784 Российского Научного фонда. Авторы благодарны проф. В.Н.Очкину за полезные обсуждения.

## *Литература*

1. ITER, Final Design Report, 2001. G31 DDD 14 01-07-19 W0.1. Section 3.1 Vacuum pumping and fuelling systems.

2. А.Б. Антипенков, О.Н. Афонин, В.Н. Очкин, С.Ю. Савинов, С.Н. Цхай. Экспериментальная проверка метода обнаружения микротечей воды в плазменно-вакуумной камере по спектру гидроксила // Физика плазмы. 2012, т. 38, № 3, с. 221-225.

3. А.Б. Антипенков, О.Н. Афонин, А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин. Измерение концентраций молекул воды в плазме с помощью комбинации спектральных и

зондовых методов // Физика Плазмы. 2015, т. 41, № 9, с. 767–777. DOI: 10.7868/S0367292115090036

4. Itikawa Y., Mason N. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2005. V. 34. № 1. P. 1.

5 Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969.

6 Цытович В.Н., Винтер Дж. Пыль в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН. 1998. Том 168. С. 899.

7 Комплексная и пылевая плазма. Из лаборатории в космос / ред.: В. Е. Фортон, Г. Е. Морфилл. - М. : Физматлит, 2012. - 443 с.

8 M. Bonitz, J. Lopez, K. Becker, H. Thomsen, Complex Plasmas: Scientific Challenges and Technological Opportunities, Springer International Publishing Switzerland 2014

9. Savitzki A., Golay M.J.E. // Anal. Chem. 1964. V. 36. № 8. P. 1627-1939.

10 N Bilik, R Anthony, B A Merritt, E S Aydil and U R Kortshagen, Langmuir probe measurements of electron energy probability functions in dusty plasmas, J. Phys. D: Appl. Phys. 48 (2015) 105204 (9pp)

11 E. Thomas Jr., K. Avinash, and R. L. Merlino, Probe induced voids in a dusty plasma, *Phys. Plasmas* **11** 1770-1774 (2004)

12 V A Godyak and V I Demidov, Probe measurements of electron-energy distributions in plasmas: what can we measure and how can we achieve reliable results? (2011) J. Phys. D: Appl.Phys. 44 233001

13 J. B. Pieper and J. Goree, Dispersion of Plasma Dust Acoustic Waves in the Strong-Coupling Regime, (1996) Phys. Rev. Lett. 77 3137

Сергей Николаевич Андреев  
Антон Владиславович Бернацкий  
Артем Сергеевич Костенко  
Владимир Владимирович Лагунов  
Сергей Николаевич Цхай  
Александр Николаевич Яцкевич

**Автоматизированная схема измерений распределений электронов по энергиям  
в плазме полого катода и комплексной плазме**

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Печать офсетная. Тираж 140 экз. Заказ №58. П.л.0,75  
Отпечатано с оригинал-макета заказчика в типографии РИИС ФИАН  
119991 Москва, Ленинский проспект 53