

УДК 533.9.082.5

УВЕЛИЧЕНИЕ ДИАПАЗОНА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОНОВ ПЛАЗМЫ В МЕТОДЕ ОДИНОЧНОГО ЗОНДА ЛЕНГМЮРА

С. Н. Андреев, А. В. Бернадский, В. Н. Очкин

Предлагается использовать новый вид сигнала, подаваемый на одиночный зонд Ленгмюра, для получения вольт-амперной характеристики. Продемонстрировано, что такой подход позволяет увеличить диапазон измеряемой функции распределения электронов по энергиям.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, разряд с полым катодом, зонд Ленгмюра.

Определение концентраций частиц в плазме важно для контроля работы сложных электровакуумных установок. Как показано в [1, 2], наиболее перспективны для такой диагностики методы оптической эмиссионной спектроскопии, среди которых лучшими по чувствительности является оптическая актинометрия [2]. В ряде случаев (когда выбор актинометрических пар ограничен) для повышения точности измерений необходимо проводить предварительную калибровку, основываясь на виде функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) [3]. При этом особенно важно иметь представление о виде ФРЭЭ в области энергий > 10 эВ (обычно в этой области лежат сечения возбуждения излучающих состояний актинометров [1]). Традиционно в физике плазмы для установления ФРЭЭ применяется метод зондов Ленгмюра [4, 5]. Этот метод, разработанный в первой половине прошлого века [6], на первый взгляд кажется очень простым, однако его использование в реальных экспериментальных условиях осложняется множеством факторов [7, 8]. В данной работе мы предлагаем метод формирования вольт-амперной характеристики (ВАХ) на зонде, который позволяет расширить диапазон измерений и уменьшить ошибки ФРЭЭ в области > 10 эВ.

Схема зондовых измерений развивает предложенную в работе [8]. Преимущество данной схемы состоит в следующем. Система формирует ВАХ зондовой цепи при подаче на зонд напряжения в виде шумового сигнала. Подавая на зонд сигнал, представляющий собой белый шум, удастся значительно уменьшить ошибки в определении

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: andreevsn@lebedev.ru.

ФРЭЭ по сравнению с традиционным периодическим сигналом (напр., пилообразным или синусоидальным) [8]. Однако в области > 20 эВ ошибка измерений остаётся высокой. В данной работе предлагается формировать ВАХ, используя шумовой сигнал с неравномерным распределением количества точек формирующего ВАХ сигнала с целью уменьшить ошибки измерений на “хвосте” ФРЭЭ.

Измерения проводились на установке “Течь” [1–3, 8–10]. Установка представляет собой вакуумную камеру (остаточное давление $\sim 10^{-7}$ мбар) с развитой системой газонапуска. Разрядное устройство состоит из полого прямоугольного вольфрамового катода, образующего полость $100 \times 50 \times 10$ мм³. С внешней стороны катод имеет изоляторы из керамических пластин. Сторона 100×10 мм², обращенная к аноду, остается открытой. Анод представляет собой вольфрамовую сетку 100×10 мм² с ячейками 1.8×1.2 мм². Расстояние между анодом и катодом 30 мм. Анод заземлен. Разряд поддерживался источником Sh0105 ($U_{\max} = 2$ кВ, $I_{\max} = 500$ мА) с возможностью стабилизации тока или напряжения. В схему питания разряда включено охлаждаемое балластное сопротивление $R = 1$ кΩ.

Измерительный зонд располагался в разрядном промежутке между анодом и катодом. Зонд представлял собой вольфрамовую проволоку диаметром 0.1 мм, выступающую из керамического изолятора на 2 мм. Рабочая часть зонда располагалась напротив геометрического центра открытой стороны катода в 3 мм от катода.

Измерения проводились в тестовом разряде в Не при давлении 1 мбар. Ток и напряжение разряда соответственно: $I_d = 168$ мА, $U_d = 251$ В. Для получения ФРЭЭ записывался массив, состоящий из 512 измеренных ВАХ. Затем каждая ВАХ дважды дифференцировалась. Итоговая ФРЭЭ и ошибки определялись путем усреднения по всему массиву.

На рис. 1 продемонстрированы результаты измерений: (а) нормированное распределение количества экспериментальных точек n в диапазоне измерений ФРЭЭ; (б), (с) вид ФРЭЭ (EEDF $f(E)$ и EEPF $F(E) = E^{-1/2} \cdot f(E)$ [4, 5] соответственно); (д) величина ошибки измерений SD (стандартное отклонение); (е) относительная ошибка измерений SE.

Как видно на рис. 1, в случае подачи на зонд напряжения в виде белого шума (кривая 1) относительная ошибка измерений SE после 24 эВ более 100%. Поэтому было предложено увеличить количество экспериментальных точек в области 24–30 эВ. При этом, как показали измерения, резкое уменьшение количества точек в диапазоне 6–18 эВ значительно увеличивает ошибку в этой области. Этими факторами и обосновывается

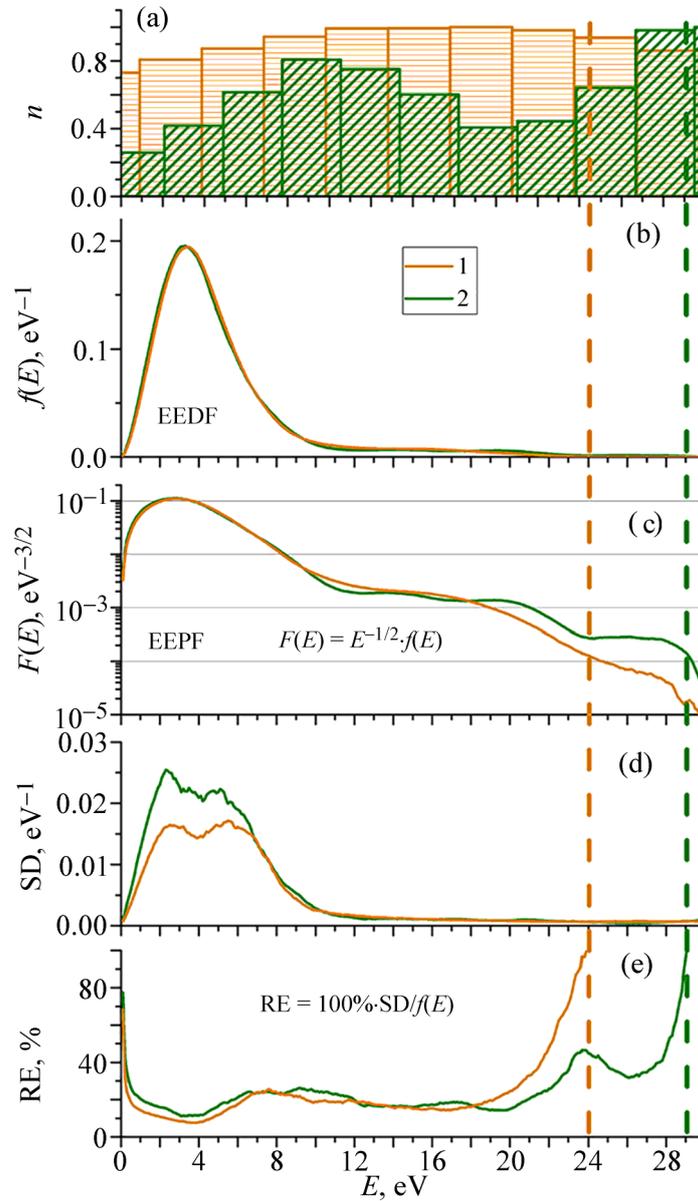


Рис. 1: Результаты измерений: (а) нормированная гистограмма количества экспериментальных точек в диапазоне измерений ФРЭЭ; (б) ФРЭЭ в виде EEDF; (с) ФРЭЭ в виде EEPF; (д) величина ошибки (стандартное отклонение); (е) относительная ошибка измерений. Сигнал, подаваемый на зонд: 1 – шумовой сигнал; 2 – шумовой сигнал с заданным распределением.

предлагаемое распределение экспериментальных точек в диапазоне 0–10 эВ – рис. 1(а) гистограмма 2.

Измерения продемонстрировали, что перераспределением точек в подаваемом на зонд сигнале удалось в диапазоне 0–18 эВ сохранить величину относительной погрешности на том же уровне, что и в случае подачи на зонд белого шума. При этом в области 18–29 эВ величина относительной ошибки уменьшилась. Таким образом удалось увеличить диапазон измерений ФРЭЭ на 5 эВ. Такой результат особенно важен именно для плазмы на основе инертных газов, атомы которых имеют пороги возбуждения излучающих электронных состояний и ионизации именно в области более 20 эВ. Это же относится к возбуждению ионов большого числа частиц и их многократной ионизации.

Предложенный способ формирования сигнала на зонде Ленгмюра позволяет расширить диапазон измерений ФРЭЭ. Очевидно, что перераспределением плотности точек в сигнале можно уменьшить ошибки измерений и в других небольших (~ 5 эВ) областях ФРЭЭ. В перспективе планируется опробовать данный подход в реальных актинометрических измерениях.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00310).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] А. В. Бернадский, И. В. Кочетов, В. Н. Очкин, *Физика плазмы* **46**(9), 783 (2020). DOI: 10.31857/S0367292120090024.
- [2] A. V. Bernatskiy, I. V. Kochetov, V. N. Ochkin, *Plasma Sources Science and Technology* **28**(10), 105002 (2019). DOI: 10.1088/1361-6595/ab4301.
- [3] А. В. Бернадский, В. Н. Очкин, Р. Н. Бафоев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **43**(6), 18 (2016). DOI: 10.3103/S1068335616060038.
- [4] V. A. Godyak, V. I. Demidov, *Journal of Physics D: Applied Physics* **44**, 233001 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/44/23/233001.
- [5] V. I. Demidov, M. E. Koeperke, I. P. Kurlyandskaya, M. A. Malkov, *Physics of Plasmas* **27**, 020501 (2020). DOI: 10.1063/1.5127749.
- [6] M. J. Druyvesteyn, *Zusammenfassung. Zeitschrift für Physik* **64**, 781 (1930). DOI: 10.1007/BF01773007.
- [7] Ю. А. Иванов, Ю. А. Лебедев, Л. С. Полак, *Методы контактной диагностики в неравновесной плазмохимии* (М., Наука, 1981).
- [8] S. N. Andreev, A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin. *Vacuum*. **180**, 109616 (2020). DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109616.

- [9] А. В. Бернацкий, В. Н. Очкин, Краткие сообщения по физике ФИАН **42**(9), 30 (2015). DOI: 10.3103/S1068335615090055.
- [10] А. В. Бернацкий, В. Н. Очкин, Р. Н. Бафоев, А. Б. Антипенков, Физика плазмы **42**(10), 949 (2016). DOI: 10.7868/S0367292116100012 10.7868/S0367292116100012.

Поступила в редакцию 7 августа 2020 г.

После доработки 20 августа 2020 г.

Принята к публикации 21 августа 2020 г.