

УДК 533.9.082

АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ РАЗВЕРТКИ ТОРЦЕВОГО ЗОНДА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА

¹⁾ Кайырды Г.К., ²⁾ Визгалов И.В.

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

E-mail: kайырды@nnc.kz

В данной работе представлен результат экспериментальной апробации методики автоколебательного режима зонда, в основе которой лежит предложенная ранее математическая модель вторично-эмиссионной неустойчивости плазменно-поверхностного контакта. Метод автоколебательного режима зонда предназначен для измерения параметров плазмы пучково-плазменного разряда (ППР) в приосевой зоне пучково-плазменных установок с продольным магнитным полем. Разработана схема измерений тока и напряжения зонда с использованием малоиндуктивного резистивного делителя напряжения, пояса Роговского с токовым шунтом и измерителей тока на эффекте Холла. Определена плотность ионного тока в приосевой зоне ППР.

Ключевые слова: зондовая диагностика, вторично-эмиссионная неустойчивость, зонд Ленгмюра, плазма, пучково-плазменный разряд.

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие плазмы с контактной поверхностью электродов и стенок является одной из важных областей исследования физики газовых разрядов и изучается уже много лет. В настоящее время изучение взаимодействия плазмы с поверхностью ТОКАМАКА является одним из актуальных вопросов, касающихся международного проекта ИТЭР. В связи с этим, ведущие страны мира в области УТС рассматривают разные методы получения плазмы, изучения плазменно-поверхностного взаимодействия и многие другие проблемы, касающиеся создания, удержания и диагностики плазмы [1–3].

На сегодняшний день зондовый метод является одним из наиболее широко используемых и информативных методов диагностики плазмы. Классический зонд имеет определенные условия применимости, одним из которых является отсутствие электронной эмиссии с поверхности зонда. Недопустимо присутствие диэлектрических пленок, которые способствуют усилению вторичной электронной эмиссии. В данной работе исследуется возможность использования высокой вторичной электронной эмиссии с поверхности зонда для измерения ионного тока насыщения в автоколебательном режиме зонда в приосевой зоне ППР. В методике автоколебательного зонда используется предложенная ранее математическая модель вторично-эмиссионной неустойчивости плазменно-поверхностного контакта.

Одним из газовых разрядов, генерирующих низкотемпературную плазму, является ППР. В основе механизма ППР лежит эффект бесстолкновительного взаимодействия пучка заряженных частиц, инжектируемого в газ. Впервые механизм ППР описан в работах Я.Б. Файнберга [4]. На аномально большое рассеяние электронов при прохождении через газ низкого давления указывалось еще в работах Ленгмюра [5].

Качественно образование ППР можно рассматривать в три этапа, которые повторяются каждый раз, когда электронный пучок вводится в газ. На первом этапе электронный пучок взаимодействует с рабочим газом и генерирует слабоионизированную плазму с низкой плотностью. Затем в результате бесстолкновительного взаимодействия этой плазмы с электронным пучком появляются ВЧ-колебания. Эти колебания обычно появляются сначала на электронной циклотронной частоте (ленгмюровские колебания). Колебательное движение электронов плазмы достаточно велико, чтобы вызвать ионизацию электронами плазмы в дополнение к тому, что производилось непосредственно электронным пучком. Эта дополнительная ионизация быстро увеличивает плотность плазмы. На последнем этапе система переходит в режим ППР. Особенностью ППР является наличие высокоэнергетичной группы электронов, способной вызывать вторичную эмиссию даже при отрицательном смещении коллекторной пластины.

Типичное устройство для возбуждения ППР состоит из трех основных узлов: электронной пушки, разрядной камеры и системы катушек для создания продольного магнитного поля с индукцией 10^{-2} –1 Тл. В простейшем случае электронная пушка состоит из термокатода и анода, хотя конструкции и режимы работы источника первичного электронного пучка могут быть самыми разнообразными [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

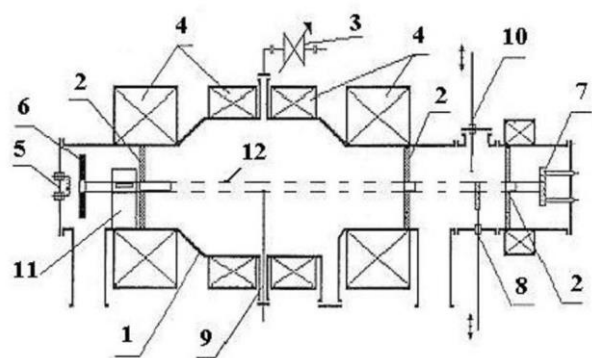
Экспериментальная апробация методики автоколебательного режима зонда была проведена на установке ПР-2 на базе кафедры физики плазмы НИЯУ МИФИ, представляющей собой открытую адиабатическую ловушку с пробочным отношением 1,55. Общая схема установки приведена на рисунке 1. Ее основой является вакуумная камера цилиндрической формы (длина 2,5 м, диаметр 0,36 м) с системой ох-

лаждения, выполненная из нержавеющей стали. Высоковакуумная откачка производится двумя диффузионными насосами производительностью 1200 л/с. Набор диафрагм дифференциальной откачки дает возможность разбивать камеру на секции. Основой магнитной системы установки являются две пары катушек с водяным охлаждением. Для изменения осевого распределения магнитного поля в торцевых частях установки, а также осуществления бокового смещения магнитной оси используются дополнительные корректирующие катушки.

Основные параметры плазмы в установке ПР-2 представлены в таблице.

Таблица. Основные параметры плазмы в установке ПР-2

Режим работы	стационарный
Рабочий газ	He, Ar, H ₂
Магнитное поле, Тл	до 0,5
Давление рабочего газа, Па	10^{-3-1}
Давление остаточного газа, Па	10^{-4}
Мощность инжектируемого электронного пучка, кВт	до 15
Плотность генерируемой плазмы, см ⁻³	до 10^{13}
Электронная температура, эВ	5–25
Отрицательное смещение на катоде относительно заземленного анода, кВ	0–5
Ток накала, А	до 15



1 - вакуумная камера; 2 - диафрагмы; 3 - система напуска газа; 4 - катушки магнитного поля; 5 - катод; 6 - делитель; 7 - коллекторное устройство; 8 - шлюзовое устройство № 1; 9 - ленгмюровский зонд; 10 - шлюзовое устройство № 2; 11 - встраиваемый масс-анализатор компонентного состава с π -поворотом в поле установки; 12 - плазменный шнур

Рисунок 1. Схема установки ПР-2 [6]

Для измерения параметров автоколебаний применялись высокочастотный делитель напряжения, пояса Роговского, высокочастотные шунты. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался высокочастотный осциллограф. Для определения параметров плазмы в периферийной области ППР применялся ленгмюровский зонд.

Метод зондов является одним из основных методов определения параметров плазмы. Он был предложен и обоснован в классических работах Ленгмюра и его соавторов [7]. Зонд представляет собой металлический электрод небольшого размера, почти полно-

стью покрытый изоляцией, а оголенной остается часть, называемая собирающей поверхностью, которая соприкасается с плазмой. Обычно измеряется вольт-амперная характеристика (ВАХ) системы, включающей измерительный зонд, опорный электрод (противозонд) и источник напряжения (рисунок 2(а)) [8].

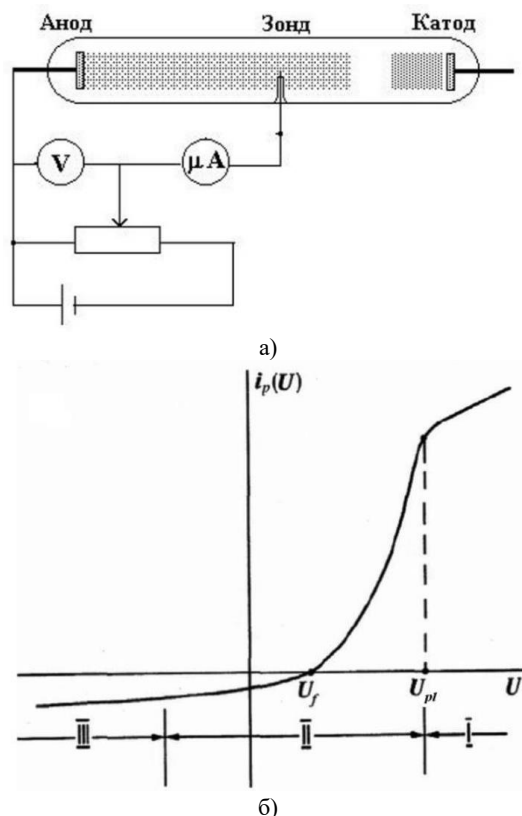


Рисунок 2. Схема зондовых измерений (а) и вольт-амперная характеристика одиночного зонда (б): U_{pl} – потенциал плазмы, U_f – плавающий потенциал [4]

Идеализированный вид ВАХ представлен на рисунке 2(б). На зондовой характеристике, в зависимости от подаваемого на зонд потенциала U_z , можно выделить три различные области: область электронного тока насыщения ($U_z > U_{pl}$), переходная область (область плавающего потенциала U_f), область ионного тока насыщения ($U_z < U_{pl}$), которая используется для измерения плотности плазмы.

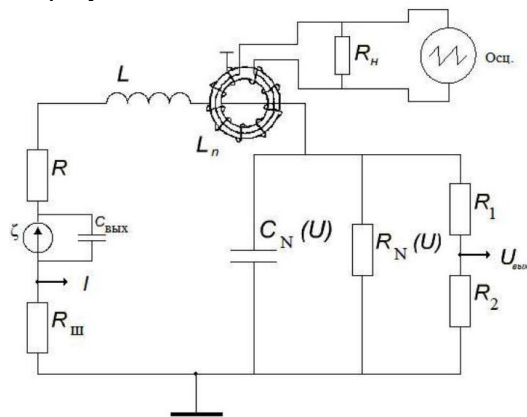
МЕТОД АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА ЗОНДА

Влияние вторичной эмиссии (электронной, ионно-электронной) является одной из характерных проблем классической зондовой диагностики. Когда ионы выбивают вторичные электроны, то на отрицательный зонд может идти большой кажущийся ионным ток. Вторичные электроны не могут покинуть зонд при положительном смещении. Эффект вторичной эмиссии трудно учесть, поэтому его следует устранять, выбирая материалы с малым коэффициентом вторичной эмиссии и работая с небольшими напряжениями на зонде.

При взаимодействии плазмы ППР с коллекторной поверхностью на поверхности коллектора может образоваться диэлектрическая пленка. Эмиссию электронов с тонких диэлектрических пленок, вызываемую электрическим полем в них, открыл Малтер в 1936 г. при исследовании вторичной электронной эмиссии слоев окиси алюминия Al_2O_3 , покрытых окисью цезия Cs_2O и находящихся на алюминиевой подложке [9]. Малтером было обнаружено, что наличие электрического поля на поверхности с диэлектрической пленкой приводит к значительному увеличению коэффициента вторичной электронной эмиссии (ВЭЭ) по сравнению с наблюдаемым в отсутствие поля [9, 10].

Использование зонда в автоколебательном режиме один из способов решения этой проблемы. В основе автоколебательного режима зонда лежит развитая ранее модель автоколебаний тока и напряжения в цепи плазменно-поверхностного контакта, которая с хорошей точностью описывает осциллограммы реальных автоколебаний, особенно в области значений импульсного напряжения, которые значительно превышают ускоряющее напряжение пушки, когда присутствует вторичная ионно-электронная эмиссия [11–14].

Для экспериментальной апробации автоколебательного режима зонда и измерений параметров плазмы ППР была разработана схема, представленная на рисунке 3.



ζ - источник ЭДС постоянного тока; R - полное сопротивление внешней цепи; L - индуктивность цепи; $C_N(U)$ - нелинейная емкость; $R_N(U)$ - нелинейное сопротивление, определяемое с помощью ВАХ $I_N(U)$; U - напряжение на контактной пластине; R_1 и R_2 - сопротивления делителя; $R_{ш}$ - сопротивление шунта; L_n - индуктивность пояса Роговского; R_n - сопротивление нагрузки

Рисунок 3. Эквивалентная электротехническая схема

Для раскачки автоколебаний необходимо, чтобы заметная часть поглощаемой энергии могла накапливаться и перераспределяться в реактивных элементах разрядной цепи L . Во-вторых, необходима положительная обратная связь через плазменно-поверхностный контакт (ППК), как нелинейный элемент (на схеме ППК представлен в виде нелинейной емкости $C_N(U)$ и нелинейного сопротивления $R_N(U)$).

Высокочастотная часть схемы выполнена коаксиальными кабелями. Для измерения напряжения использовался малоиндуктивный резистивный делитель напряжения с коэффициентом деления 1:2000. Для измерения высокочастотной составляющей тока использовался пояс Роговского и коаксиальный шунт, а также использовались датчики тока на эффекте Холла марки CSNR161-002 компании Honeywell и токовый пробник для осциллографа Pintek PA-622. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался высокочастотный осциллограф Tektronix TPS2014.

Состояние системы характеризуется полным током в цепи электрода $I(t)$ и его потенциалом $U(t)$. Динамические переменные $I(t)$ и $U(t)$ и их производные связаны уравнениями Кирхгофа для полного напряжения замкнутой цепи и точки вхождения тока:

$$\begin{aligned} \zeta &= U + IR + L \frac{dI}{dt}, \\ I &= I_N(U) + \varepsilon_0 \frac{dE}{dt} S, \end{aligned} \quad (1)$$

где $I_N(U)$ – мгновенная (конвективная) ВАХ зонда, принимающая N-образную форму в области ионного насыщения в результате повышенной вторичной электрон-электронной эмиссии под воздействием надтепловой группы электронов на контактную поверхность зонда. Нелинейная система дифференциальных уравнений (1) используется при анализе устойчивости и при численном моделировании параметров автоколебаний. При определенных условиях зарядовый обмен между плазмой и отрицательно смещенной коллекторной пластиной становится неустойчивым. В результате ВАХ зонда становится неоднозначной по току и приобретает N-образный вид с участком отрицательного дифференциального сопротивления, благодаря которому и возможна автогенерация электромагнитных колебаний в цепи коллектора. Характерный вид мгновенной ВАХ при наличии диэлектрического покрытия на контактной поверхности зонда и в присутствии надтепловой группы в электронном энергетическом спектре плазмы показан на рисунке 4(а).

На рисунке 4(б) показан, в увеличенном виде, хорошо наблюдаемый при малом шаге изменения напряжения излом ВАХ при переходе через плавающий потенциал (U_{nl}). Появление затянутого перехода через U_{nl} при нулевом токе информирует о формировании диэлектрической пленки на контактной поверхности под действием плазмы и остаточного газа. Для обеспечения проводимости поперек пленки необходимо приложить относительно небольшое напряжение. С ростом мощности ВЧ-автоколебаний и количества надтепловых электронов разряд может принять самостоятельную автоколебательную форму, т.е. существовать без источника высокоэнергетичных первичных электронов, как это имеет место в ППР.

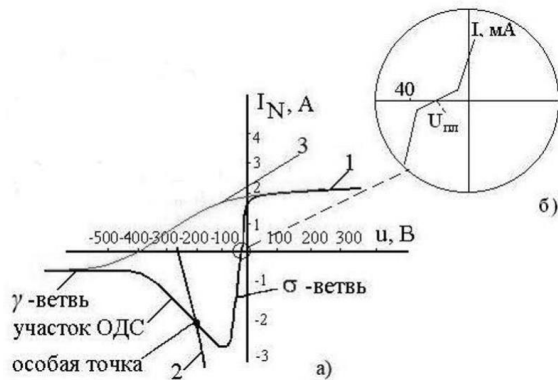


Рисунок 4. Характерный вид мгновенной ВАХ:

а) 1 – при наличии надтепловых электронов, 2 – нагрузочная характеристика источника смещения пластины, 3 – классическая характеристика зонда; б) особенность ВАХ в окрестности плавающего потенциала, определяемая наличием тонкой диэлектрической пленки

Для определения параметров плазмы снимались осциллограммы тока и напряжения автоколебаний с контактной поверхности коллекторной сборки, площадь взаимодействия которой регулируется охлаждаемой диафрагмой в высокочастотном и высоковольтном релаксационном режиме с использованием только постоянного источника ЭДС. Соответствующая релаксационным автоколебаниям фазовая траектория дважды пересекает ВАХ при максимальном и минимальном напряжении.

Эксперименты проводились на водородной плазме. Давление в камере было 0,66 Па, давление в пушке – $4,9 \cdot 10^{-3}$ Па, давление в области коллектора – 0,41 Па. Режим пушки 100 мА/1 кВ. На рисунке 5(а, б) представлены соответственно характерная экспериментальная осциллограмма и расчетный график автоколебательной развертки напряжения (желтая кривая) и силы тока (синяя кривая), снятые с делителя напряжения и пояса Роговского, в режиме при индуктивности $L_n = 10$ мГн, который соответствует релаксационному типу автоколебаний. Из рисунка 5(б) – напряжение контактной поверхности колеблется в диапазоне от –280 В до –1200 В.

Информация о постоянной составляющей тока снималась с источника постоянного смещения и учтена в представленных графиках. Анализ осциллограмм осложняется наведенными шумами (ток, напряжение).

Следующий эксперимент проводился с использованием измерителя тока марки CSNR161-002 компании Honeywell. Давление рабочего газа (водорода) в камере 0,66 Па, давление в секции пушки $5,1 \cdot 10^{-3}$ Па, давление в области коллектора 0,41 Па. Режим пушки: 100 мА/1 кВ. Индуктивность: $L_n = 10$ мГн.

Характерная экспериментальная осциллограмма автоколебательной развертки напряжения (желтая кривая) и силы тока (синяя кривая) снятая при применении датчика Холла представлена на рисунке 6.

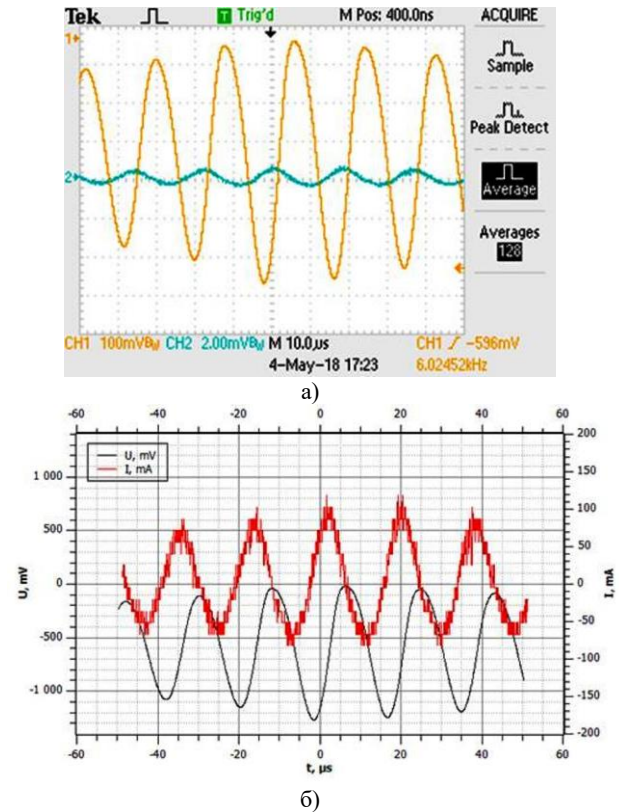


Рисунок 5. Экспериментальные данные, снятые с применением пояса Роговского: а) осциллограмма сигналов развертки напряжения (желтая кривая) и тока (синяя кривая); б) расчетный экспериментальный график

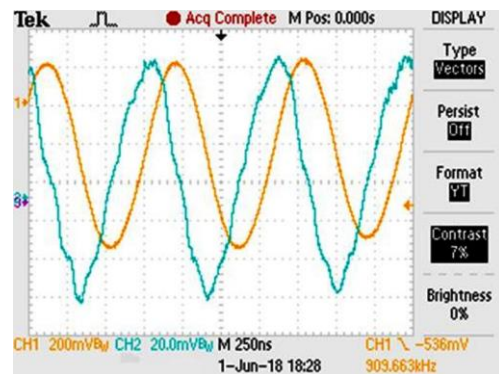


Рисунок 6. Осциллограмма сигналов развертки напряжения (желтая кривая) и тока (синяя кривая)

По представленной методике автоколебательного режима зонда постоянная составляющая тока, которая соответствует ионному току насыщения и вторичному ионно-электронному эмиссионному току $I + (1 + \gamma)$ и должна иметь отрицательные значения. На осциллограмме постоянная составляющая тока поднята вверх, так как датчик Холла сначала был произвольно вставлен в схему, поэтому значения по току при расчетах инвертированы (рисунок 7).

На рисунке 7 заметно сильное запаздывание тока относительно сигнала напряжения. Хотя, как уже отмечалось, в рамках модели автоколебательного зонда

ток должен опережать. И такой сдвиг сигнала свидетельствует о том, что присутствуют паразитные емкостные и индуктивные составляющие измерителя тока на основе эффекта Холла, а также одной из причин запаздывания сигнала тока с измерителя является компенсационная катушка, встроенная в сам измеритель.

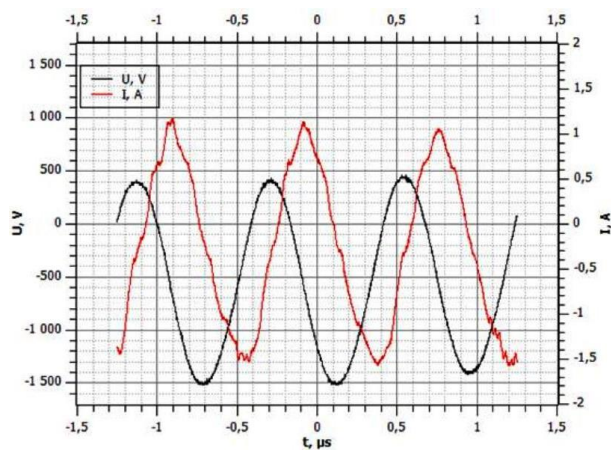
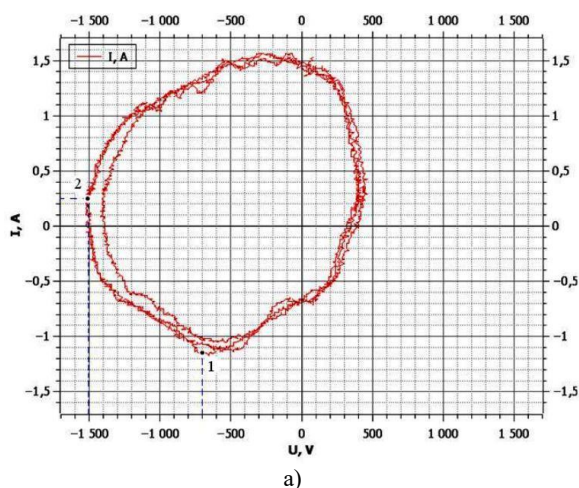
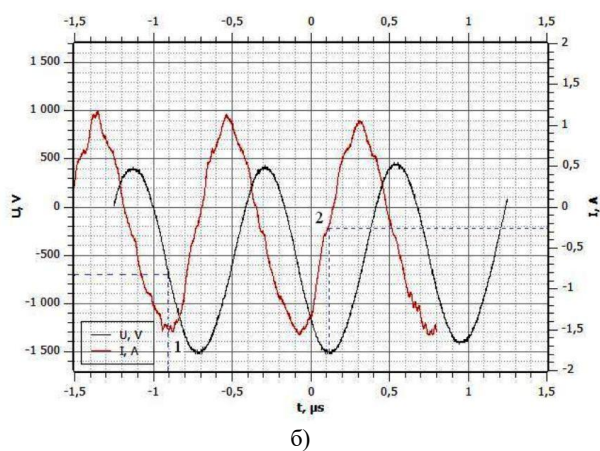


Рисунок 7. Обработанные экспериментальные данные



а)



б)

Рисунок 8. Фазовая траектория (а) и фазированный экспериментальный график сигналов тока и напряжения (б)

Фазировку сигналов тока и напряжения провели в соответствии с методикой автоколебательного режима зонда с использованием реперных точек: точка (1) пересечения фазовой траектории с нагрузочной характеристикой источника постоянного смещения, значение смещения в этот момент хорошо известно, поскольку задается постоянным источником напряжения; точка (2) пересечения фазовой траектории с ВАХ зонда (рисунок 8(а)). Максимум отрицательного значения тока на зонд должен соответствовать моменту соответствующему точке (1), поэтому к значению напряжения на источнике постоянного смещения 700 В сдвигаем максимум отрицательного тока. Далее определяем точку пересечения перпендикуляра, проведенного из максимума отрицательного напряжения -1500 В к линии тока, которая согласно модели соответствует реперной точке (2) при пересечении фазовой траектории с ионной ветвью ВАХ и позволяет определить ионный ток насыщения. Из рисунка 8(б) видим, что в данном эксперименте сдвиг по фазе равен $0,45$ мкс, а плотность ионного тока насыщения равна $0,25$ А/см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена экспериментальная апробация методики автоколебательного режима зонда на установке с ППР. Полученные результаты показали, что использование торцевого зонда в режиме развития автоколебательной вторично-эмиссионной неустойчивости с генерацией высоковольтных релаксационных автоколебаний может дать вполне достоверную информацию о плазменных параметрах в приосевой области, позволяет при отсутствии специальной системы развертки измерить ток ионного насыщения именно для относительно больших смещений, когда классический зонд в режиме обычной медленной развертки может в значительной степени испытывает пробои, искажающие результаты измерения.

Предлагаемая методика также может быть применена на имитационном стенде с плазменно-пучковой установкой (ИСППУ) на базе филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК. Для реализации автоколебательного режима даны следующие рекомендации:

- разработать торцевой зонд в виде коллекторной сборки с охлаждаемой диафрагмой;
- обеспечить условие вторичной эмиссии электронов с поверхности зонда путем подачи отрицательного электрического смещения;
- внедрить в систему диагностики плазмы ИСППУ средства измерения тока плазмы (пояс Роговского или токовый измеритель на основе эффекта Холла);
- адаптировать информационно-измерительную систему для регистрации ВАХ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tazhibayeva I., Skakov M., Baklanov V., Koyanbaev E., Miniyaev A., Kulsartov T., Ponkratov Y., Gordienko Y., Zaurbekova Z. Study of properties of tungsten irradiated in hydrogen atmosphere // Nuclear Fusion. – 2017. – Vol. 57. – No 12. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7911>
2. Rahadilov B.K., Skakov M.K., Tulenbergenov T.R. Tungsten surface by hydrogen plasma irradiation // Key engineering materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 46–51. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.736.46>
3. Tulenbergenov T., Skakov M., Kolodeshnikov A., Zuev V., Rakhadilov B., Sokolov I., Ganovich D., Miniyaev A., Bukina O. Interaction between nitrogen plasma and tungsten // Nuclear Materials and Energy, July 2017. – P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.07.005>
4. Файнберг Я.Б. Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой. – Атомная энергия, 1961. Т. 11. http://elbib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t11-4_1961/go,32/
5. Langmuir I., Mott-Smith H. // Physical Review – 1926. – Vol. 28. – No 5. – P. 727–763.
6. Визгалов И.В., Курнаев В.А., Тельковский В.Г., и др. Лабораторный практикум по курсу «Физика горячей плазмы и УТС». Под редакцией Тельковского В.Г. Москва. МИФИ, 1995.
7. Langmuir I., Blodgett K. // Physical Review – 1923. – Vol. 22. – P. 34.
8. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. 3-е изд. переработанное и дополненное. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2009 – 311–336 с.
9. L. Malter. Anomalous secondary electron emission a new phenomenon. // Phys. Rev. – 1936. – No 49. P. 478.
10. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: 1966. – С.315-401.
11. Vizgalov I.V., Kirnev G.S., Kurnae V.A., Sarytchev D.V., Savjolev A.S. Penning discharge in regime of RF autogeneration. // Proc. Of XXII international conf. On phenomena in Ionized Gases, Toulouse, France. – 1997. – Vol. II. – P. 26.
12. Визгалов И.В. и др. Исследование механизмов зажигания и условий существования самостоятельного ВЧ-автогенерирующего разряда. // VIII-я конференция по физике газового разряда, Рязань. – 1996. – Ч. 1. – С. 86–87.
13. Визгалов И.В., Кирнев Г.С., Курнаев В.А. // Известия РАН, сер. Физическая. Т. 60. 1996. – С. 168.
14. Акел М. Электромагнитные колебания при неустойчивом плазменно-поверхностном взаимодействии: дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. М.: 2014.

СӘУЛЕЛІ-ПЛАЗМАЛЫҚ РАЗРЯДЫН ЗЕРТТЕУІ УШІН ШЕТЖАҚТЫҚ ЗОНДТЫҢ ЖАЙМАСЫНЫҢ АВТОТЕРБЕЛІСТІК РЕЖИМІ

¹⁾ Ғ.Қ. Қайырды, ²⁾ И.В. Визгалов

¹⁾ ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

²⁾ «МИФИ» ұлттық ядролық зерттеу университеті, Мәскеу, Ресей

Бұл мақалада бұрын дамыған плазмалы беткі түйісуінің екінші ретті электрондық эмиссияның тұрақсыздығының математикалық моделіне негізделген зондтың автотербелістік режиміндегі әдістемесінің эксперименттік анықтауының нәтижесі келтірілген. Зондтың автотербелістік режиміндегі әдіс бойлық магнит өрісі бар сәулелі-плазмалық қондырғының ось аймағындағы сәулелі-плазмалық разрядтың плазмасының параметрлерін өлшеуге арналған. Төмен индуктивті резистивті кернеу бөлгішті, Роговский белдеуін мен тоқ шунттын және Холл әсеріндегі тоқ өлшеуішті пайдалана отырып, зондтың тоғын және кернеуін өлшеуге арналған схема құрастырылды. Сәулелі-плазмалық разрядтың ось аймағындағы иондық тоғының тығыздығы анықталды.

Кілт сөздер: зондтық зерттеу, екінші ретті электрондық эмиссияның тұрақсыздығы, Ленгмюр зонды, плазма, сәулелі-плазмалық разряд.

AUTO-OSCILLATING MODE OF SCAN OF BUT END PROBE FOR DIAGNOSTICS OF BEAM-PLASMA DISCHARGE

¹⁾ G.K. Kaiyrdy, ²⁾ I.V. Vizgalov

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

This paper presents the result of experimental testing of the methodology auto-oscillating mode probe, which is based on a previously developed mathematical model of the secondary emission instability of a plasma-surface contact. The method of auto-oscillating mode probe is designed to measure the plasma parameters of beam-plasma discharge (BPD) in the near-axial zone of a beam-plasma installation with a longitudinal magnetic field. A scheme had been developed for measuring the current and voltage of the probe using a low-inductance resistive voltage divider, the Rogowski coil with the current shunt, and current meter on the Hall effect. The ion current density in the near-axial zone of the SPR was determined.

Keywords: probe diagnostics, secondary emission instability, Langmuir probe, plasma, beam-plasma discharge.