

Система диагностики на основе тройного зонда Ленгмюра на плазменно-пучковой установке

А.Ж. Кайырбекова^{1,2,}, И.А. Соколов^{1,2}, Г.К. Жанболатова¹, Т.Р. Туленберген^{1,2},
А.Ж. Миниязов¹*

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

²НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

*kaiyrbekova@nnc.kz

Аннотация. В рукописи представлены результаты научных исследований по разработке тройного зонда для плазменно-пучковой установки (ППУ). На основе анализа литературы выбраны две конструкции для разработки тройного зонда Ленгмюра. Реализована электрическая схема, подходящая для ППУ, проведен монтаж разработанного зонда, настройка системы диагностики тройного зонда и проведены пуско-наладочные работы. Получены первые результаты экспериментов по определению параметров плазмы с использованием метода тройного зонда. По результатам испытания было определено, что тройной зонд показывает показания близкие к показанию одиночного зонда.

Ключевые слова: тройной зонд Ленгмюра, стационарная плазма, диагностика плазмы, вольт-амперная характеристика, импульсная плазма.

1. Введение

Параметры плазмы играют важную роль при исследовании взаимодействия плазмы с поверхностью кандидатных материалов термоядерного реактора. Для определения параметров плазмы, таких как плотность электронов n_e , электронная температура T_e , потенциал плазмы V_{pl} и плавающий потенциал V_{fl} используется зонд Ленгмюра [1]. В зависимости от режима работы и электродов различают одиночный, двойной и многоэлектродные зонды Ленгмюра. Электрические зонды Ленгмюра были установлены во многих устройствах, таких как DIII-D [2], JT-60 [3], EAST [4], KSTAR [5] и W7-X [6], а также на линейных установках. Как правило, линейные плазменные установки используются для предварительных материаловедческих исследований, позволяющие проводить моделирование воздействия на стенки реактора при необходимых характеристиках потока плазмы. Одним из линейных установок является плазменно-пучковая установка (ППУ), которая используется для исследования плазмы с поверхностью маломасштабных образцов конструкционных материалов [7–8]. К основным элементам ППУ относятся камера откачки электронно-лучевой пушки (ЭЛП), вакуумная камера взаимодействия, пучково-плазменный разряд (ППР) с возможностью получения сверхвысокого предельного вакуума порядка 10^{-6} Торр и диагностическая система. С помощью ЭЛП и продольного магнитного поля создается электронный пучок, который транспортируется в камеру взаимодействия. При взаимодействии электронного пучка с рабочим газом образуется стационарная плазма. Стационарная плазма дает возможность достигать плотность плазмы до $\sim 10^{17}\sim 10^{18}$ м⁻³. Однако такой диапазон плотности плазмы является низкой для работы первой стенки и дивертора в реакторе, в результате чего необходимо модернизировать установки на импульсный режим работы. В импульсных плазменных установках достигаются более высокие плотности мощности, энергии и концентрации ионных пучков. При использовании одиночного зонда в импульсной плазме, именно в режиме ионного насыщения, зонд начинает терять данные о температуре электронов при этом достигая высокое временное разрешение [9]. Данное затруднение можно избежать при использовании тройного зонда. Тройной зонд обеспечивает одновременные измерения температуры и концентрации электронов с возможностью пересчета параметров зондовой цепи в локальные параметры плазмы через простые соотношения [10]. Поскольку это является особенностью данного

метода, он может стать одним из важных диагностических методов не только для быстро меняющейся нестационарной плазмы, но и для стационарной плазмы. В связи с этим авторами данной работы разработан тройной зонд, предназначенный для ППУ.

2. Методы исследования и оборудование

Выбор оптимальной конфигурации расположения электродов зонда, связан с особенностями конкретной задачи. Поэтому, большое внимание должно быть уделено разработке электрических схем зондовых диагностик и расположению зонда для проведения достоверных измерений параметров плазмы. На основе аналитического обзора литературы [11–16] для разработки тройного электростатического зонда выбраны две конструкции, показанные на Рис. 1, с разным расположением электродов. Как видно из Рис. 1, тройной зонд состоит из трех идентичных измерительных вольфрамовых электродов, помещенных в изолятор, в качестве которого используются керамические трубки. Материалы зонда выбраны с учетом механической прочности, температуры плавления, шероховатости поверхности и электрической проводимости. Диаметр каждого электрода составляет 1 мм, длина каждого электрода – 4 мм. Изолятор зонда изготовлен из керамической трубки длиной 110 мм с внутренним диаметром 1.5 мм.

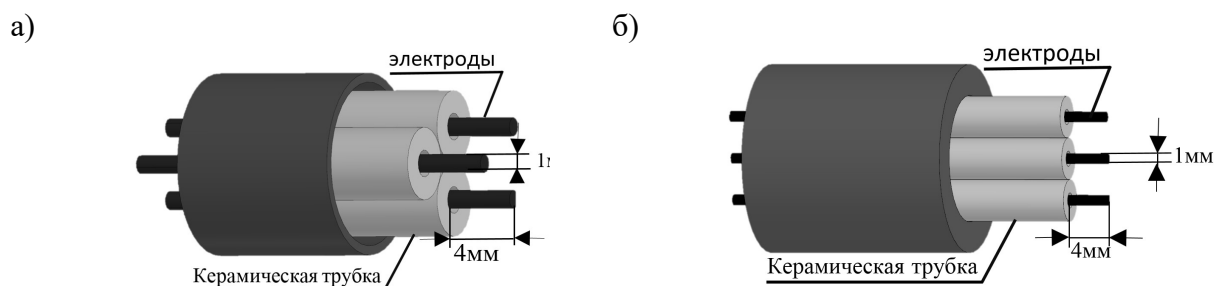


Рис. 1. Схема измерительного участка тройного зонда с расположением электродов в виде треугольника (а) и в один ряд (б).

Разработанный тройной зонд установлен на одном из боковых фланцев камеры взаимодействия плазменно-пучковой установки, в которой происходит облучение материала плазмой. Общий вид ППУ и установленного тройного зонда показан на Рис. 2.

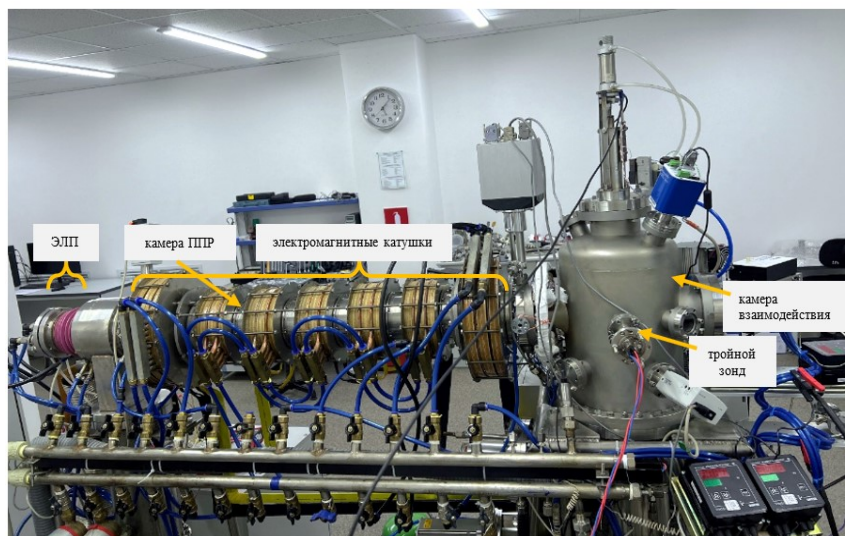


Рис. 2. Общий вид ППУ и установленного тройного зонда.

Тройной зонд подключен по схеме, которая представлена на Рис. 3.

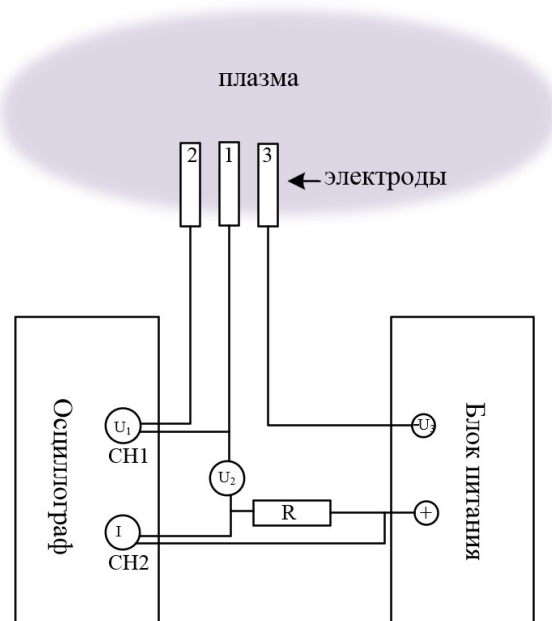


Рис. 3. Принципиальная схема подключения тройного электростатического зонда.

Как видно из Рис. 3, принципиальная схема состоит из электродов тройного зонда, блока питания для подачи отрицательного потенциала на третий электрод, осциллографа для измерения значения напряжения между первым и вторым электродами через канал CH_1 и резистора R , через который мы получаем значение тока от зонда. Для проведения экспериментов использовались блок питания КЕРСО, осциллограф TPS2012В, резистор сопротивлением 520 Ом и мультиметр Lini-T.

При использовании тройного зонда вся схема измерения должна быть заземлена. Для определения параметров плазмы требуется знать мгновенные значения падения напряжения между первым и вторым электродами U_{1-2} и тока I , приходящего на второй канал осциллографа (CH_2). Когда зонд помещается в плазму, на I электрод подается положительное напряжение от блока питания и между электродами 1 и 2 появляется разность потенциалов U_{1-2} , которая регистрируется первым каналом осциллографа (CH_1). За счет этого по электродам 1 и 2 потечет ток I_{1-2} , для измерения которого использовался резистор сопротивлением $R = 93$ Ом. После определения температуры электронов, можно определить концентрации плазмы по формуле [10]:

$$n_e = \frac{\exp\left(\frac{1}{2}\right)}{eS \sqrt{\frac{eT}{M_i} \left(\exp\left(\frac{U_2}{T}\right) - 1 \right)}}, \quad (1)$$

3. Результаты и обсуждение

После монтажных работ проводились пуско-наладочные работы (ПНР). В качестве рабочего газа использовался водород. Ниже в Таблице 1 приведены условия проведения ПНР и расчетные значения T_e и n_e , полученные в результате измерения ВАХ тройным и одиночным зондами.

Таблица 1. Условия проведения ПНР и значения T_e и n_e .

U , кВ	P , Горт	Одиночный зонд		Тройной зонд	
		T_e , эВ	n_e , м^{-3}	T_e , эВ	n_e , м^{-3}
2	$1.3 \cdot 10^{-3}$	7	$1.26 \cdot 10^{16}$	7	$1 \cdot 10^{16}$
2	$4.4 \cdot 10^{-3}$	7	$3.07 \cdot 10^{15}$	7.3	$2.4 \cdot 10^{15}$

По результатам испытания было определено, что тройной зонд показывает показания близкие к показанию одиночного зонда.

4. Заключение

В результате выполнения данной работы разработан тройной зонд, произведен подбор измерительного оборудования и монтаж разработанного зонда, выполнена настройка системы диагностики тройного зонда и проведены пуско-наладочные работы.

Получены первые результаты экспериментов по определению параметров плазмы методом тройного зонда. По результатам испытания было определено, что тройной зонд демонстрирует показатели, аналогичные показателям одиночного зонда. Значение электронной температуры составляло 7 эВ, а концентрация плазмы 10^{16} м^{-3} . Следовательно, его можно использовать при проведении реального эксперимента.

Благодарность

Данное исследование выполнено в рамках грантовых средств Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP13068552).

5. Список литературы

- [1] F.F. Chen, Langmuir Probe Diagnostics, *IEEE-ICOPS meeting*, 1, 2003.
- [2] D. Buchenauer, W.L. Hsu, J.P. Smith, D.N. Hill, Langmuir Probe Array for the DIII-D Divertor, *Review of Scientific Instruments*, vol. **61**, 2873, 1990; doi: /10.1063/1.1141811
- [3] N. Asakura, K. Shimizu, N. Hosogane, K. Itami, S. Tsuji, M. Shimada, Recycling Enhancement with n_e and Q_{eff} in High-Density Discharges on Jt-60u, *Nuclear Fusion*, vol. **35**, 381, 1995; doi: 10.1088/0029-5515/35/4/I02
- [4] J.C. Xu, et al., Upgrade of Langmuir probe diagnostic in ITER-like tungsten mono-block divertor on experimental advanced superconducting tokamak, *Review of Scientific Instruments*, vol. **87**, 083504, 2016; doi: 10.1063/1.4960181
- [5] J.G. Bak, S.G. Lee, J.Y. Kim., Electrical Probe Diagnostics for KSTAR, *Contributions to Plasma Physics*, vol. **50**, 892, 2010; doi: 10.1002/ctpp.201010151
- [6] S. Pandey, A. Carls, Pop-up Langmuir probe diagnostic in the water cooled divertor of Wendelstein 7-X, *Review of Scientific Instruments*, vol. **95**(4), 043503, 2024; doi: 10.1063/5.0188738
- [7] А.А. Колодешников, В.А., Зуев Д.А. Гановичев, Т.Р. Туленбергенов, и др., Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой, *Патент РК*, № 2080, РГП НЯЦ РК. № 2016/0108.2; заявл. 29.02.2016; опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5. 3с.
- [8] Пооперационная программа имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой: пооперационная программа № 12-230-02/145 от 27.09.2022 г.
- [9] Райзер Ю.П., *Физика газового разряда*, Долгопрудный: Интеллект, 2009.
- [10] H.M. Mott-Smith, L. Irving, The Theory of Collectors in Gaseous Discharges, *Physical Review Journals Archive*, vol. **28**, 727, 1926; doi: 10.1103/PhysRev.28.727
- [11] A. Qayyum, N. Ahmad, S. Ahmad, F. Deeba, R. Ali, S. Hussain, Time-resolved measurement of plasma parameters by means of triple probe, *Review of Scientific Instruments*, vol. **84**, 123502, 2013; doi: 10.1063/1.4838658

- [12] M.Y. Naz, A. Ghaffar, Double and triple Langmuir probes measurements in inductively coupled nitrogen plasma, *Progress In Electromagnetics Research*, vol. **114**, 2011; doi: 10.2528/PIER10110309
- [13] Sin-Li. Chen, T. Sekiguchi, Instantaneous Direct-Display System of Plasma Parameters by Means of Triple Probe, *Journal of Applied Physics*, vol. **36**(8), 1965; doi: 10.1063/1.1714492
- [14] D. Bondarenko, et al., Engineering design of plasma generation devices using Elmer finite element simulation methods, *Engineering Science and Technology*, 2016; doi: 10.1016/j.jestch.2016.07.015
- [15] R. Roussel, G. Andonian, C. Hansel, G. Lawler, W. Lynn, N. Majernik, R. Robles, K. Sanwalka, E. Wisniewski, J. Rosenzweig, Externally Heated Hollow Cathode Arc Plasma Source for Experiments in Plasma Wakefield Acceleration, *Instruments*, vol. **3**, 48, 2019; doi: 10.3390/instruments3030048
- [16] A. Qayyum, N. Ahmad, S. Ahmad, F. Deeba, R. Ali, S. Hussain, Time-resolved measurement of plasma parameters by means of triple probe, *Review of Scientific Instruments*, vol. **84**, 123502, 2013; doi: 10.1063/1.4838658