The XXVI International Conference on Ion-Surface Interactions (ISI-2023)

21–25 August 2023 Yaroslavl, Russia



DEVELOPMENT OF AN ELECTROMAGNETIC SYSTEM FOR SCANNING A PRIMARY ELECTRON BEAM ON A PLASMA-BEAM INSTALLATION

<u>1,3</u>Т.Р. ТУЛЕНБЕРГЕНОВ, ²М.К. СКАКОВ, ¹Б.Ж. ЧЕКТЫБАЕВ, ^{1,3}А.Ж. МИНИЯЗОВ, ^{1,3}И.А. СОКОЛОВ ^{1,3}T.R. TULENBERGENOV, ²M.K. SKAKOV, ¹B. ZH. CHEKTYBAYEV, ^{1,3}A.Zh. MINIYAZOV, ^{1,3}I.A. SOKOLOV ¹Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан, ул. Бейбіт атом, 10, tulenbergenov@nnc.kz ²РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан, ул. Бейбіт атом, 2Б, ³НАО «Университет имени Шакарима города Семей», Семей, Казахстан

The work is devoted to the development of an electromagnetic system for scanning a primary electron beam on a plasma-beam installation, which allows one to significantly reduce the specific thermal power, increase the total discharge power, simulate processes with extreme thermal loads, and perform recrystallization annealing of samples with a minimum temperature gradient over the surface.

Введение

В поддержку исследований на токамаке КТМ для проведения маломасштабных экспериментальных работ в области взаимодействия плазмы с поверхностью, а также тестирования в НЯЦ РК создана специализированная плазменно-пучковая установка (ППУ), схема которой показана на Fig.1 [1, 2].

ППУ является универсальной и позволяет проводить испытание материалов в условиях комплексного воздействия на них как плазменного потока, так и мощной тепловой нагрузки, создаваемой с помощью электронного пучка. ППУ состоит из трех основных узлов: электронной пушки, разрядной камеры и системы электромагнитных катушек для создания продольного магнитного поля с напряженностью 0,1 Тл [3, 4]. В вакуумном режиме без напуска газа на мишень в продольном магнитном поле транспортируется компенсированный электронный пучок. С его помощью можно изменять в широких пределах как общую мощность до 10 кВт, так и плотность теплового потока на поверхность испытываемых материалов до 50 МВт/м².

Это обеспечивает очень широкий комплекс теплофизических экспериментов, а также возможность проведения отжига образцов и исследования их термодесорбции. В режиме пучково-плазменного разряда (ППР) при напуске рабочего газа в камеру взаимодействия достаточно широко можно варьировать параметрами генерируемой плазмы за счет рабочего давления, тока и энергии электронов в первичном пучке, тока в катушках магнитного поля. Общий ионный выход на мишень в режиме ППР может достигать 2 А.

ППР генерирует сильнонеравновесную плазму с выраженным надтепловым «хвостом» в энергетическом распределении электронов. Подобные высокоэнергетические группы электронов в силу особенностей работы токамака появляются и в периферийной плазме. Они могут приводить к появлению нестационарных, динамических дебаевских слоев с большой амплитудой изменения приэлектродных полей и токов, что кардинальным образом изменяет характер плазменно-поверхностного взаимодействия и переносов в периферии. Пучково-плазменный разряд по своим специфическим свойствам позволяет достаточно просто проводить моделирование таких эффектов.



l – electromagnetic system; 2 – electron gun; 3 – discharge chamber; 4 – electron beam scanning system; 5 - collector: 6 - interaction chamber Fig.1 Scheme of the plasma-beam installation

Для реализации методик проведения многих имитационных экспериментов необходимо смещать по поверхности коллектора первичный электронный пучок. Это может быть удобно для управления плотностью потока энергии на поверхность коллектора при форсировании мощности плазменно-пучкового разряда, для увеличения плотности ионного тока, а также для обеспечения перехода от ионного облучения к программируемому электронному нагреву. Примерами являются линейный нагрев при снятии термодесорбционных спектров или рекристаллизационный отжиг образцов с минимальным градиентом температуры по поверхности. Для этих целей была разработана, изготовлена и испытана электромагнитная система развертки первичного электронного пучка.

Экспериментальная часть

В рамках экспериментальных работ испытана электромагнитная система развертки первичного электронного пучка. На Fig.3 показано

Отклоняющая электромагнитная система создает магнитное поле, силовые линии которого направлены перпендикулярно электронному пучку Часто при расчете отклоняющих систем полагают, что магнитное поле однородно. В данных условиях траектория электрона представляет собой дугу окружности радиуса R. Радиус окружности определяется по известному выражению (1), полученному из формулы силы Лоренца [5],

$$R = \frac{m \cdot \nu_e}{eB},\tag{1}$$

где В – величина индукции отклоняющего поля, имеющая постоянное значение на всей протяженности поля Z, v_{e} – скорость движения электрона, ускоренного под действием разности потенциалов U и движущегося по инерции:

$$e = \sqrt{\frac{2e}{m}U}.$$
(2)

Пройдя через отклоняющую магнитную систему, электрон изменяет исходное направление движения в направлении силы Лоренца. Точка встречи с мишенью отклонится на величину линейного перемещения, которая определяется расстоянием L от центра отклоняющей системы до поверхности изделия и углом отклонения θ :

$$= L \cdot tg\theta. \tag{3}$$

Поскольку величина углов отклонения не превышает 5–7°, то можно записать:

 \bigcirc

 \geq

$$tg\theta \approx sin\theta = \frac{Z}{R} = \frac{Z \cdot B}{\sqrt{\frac{2mU}{\rho}}}.$$

1 - coils; 2 - magnetic circuit; 3 – electron beam; 4 - interaction chamber Fig.2 Appearance and general scheme of the electromagnetic system for scanning the primary electron beam

Система развертки первичного электронного пучка состоит из четырех катушек поперечного смещения, расположенных под углом 90° друг к другу снаружи в выходной части секции транспортировки пучка перед камерой взаимодействия. Внешний вид и общая схема отклоняющей электромагнитной системы для ППУ представлена на Fig.2. Для управления разверткой используется специальный двухканальный усилитель тока, питающий попарно электромагнитные

катушки развертки и программное обеспечение, задающее закон отклонения пучка во времени, путем изменения амплитуды, частоты сигнала и сдвига по фазам.

отклонение первичного электронного пучка на вольфрамовой пластине и осциллограммы в режиме ХҮ, при котором сигнал одного из каналов отображается по горизонтальной оси Х, а сигнал второго канала по вертикальной оси Ү. При сдвиге фаз сигналов на 90 градусов и одинаковых значениях амплитуды и частоты система развертки отклоняет первичный пучок по окружности, Fig.3a. При нулевом значении амплитуды одного из каналов отклонение первичного пучка происходит по вертикали или горизонтали, Fig.2b и Fig.3c, а при разных частотах сигналов отклонение первичного пучка происходит по прямоугольному сечению Fig.3d.



a) circumferential deviation

SAVE/REC

Action

Save Image

Format

About

Saving

Images

Select

Folder

Save

TEK0004.8N

XY Mode

c) vertical deviation

28-Feb-23 08:42

b) horizontal deviation

Tek .n.

SAVE/REC

XY Mode

d) rectangular deviation

Action

Save Image

File

Format

BMP

About

Saving

Images

Select

Folder

Save

TEK0006.BMP

Fig.3 Deviation of the primary electron beam of the electromagnetic system of the plasma-beam installation

Current Folder is A:\

CH1 50.0mV CH2 50.0mh

Таким образом, варьируя значениями амплитуды, частоты и сдвигом фаз, можно задавать различные формы воздействия электронным пучком.

Выводы

(4)

Tek .n.

CH1 50.0m/V CH2 50.0m/V

Экспериментально установлено, что для эффективного вывода первичного пучка из приосевой зоны плазменно-пучкового разряда радиусов радиального расширения пучка R>3r. Это позволяет увеличить мощность в разрядном режиме с 4 кВт при нормальном падении электронов на поверхность коллектора до 8 – 10 кВт при наклонном падении электронов. В таких режимах ограничение мощности связано только с предельным нагревом стенок вакуумной камеры и ее окон тепловым излучением неохлаждаемого коллектора, но при кратковременном включении разряда в отладочных экспериментах это вполне допустимо.

За счет быстрой развертки электронного пучка по большей площади рассматриваемая электромагнитная система позволяет значительно снижать удельную тепловую мощность, выделяющуюся на поверхности коллектора в результате бомбардировки первичными электронами. Это же обстоятельство позволяет значительно поднять общую разрядную мощность ППР, а следовательно, плотность плазмы, степень ионизации и плотность ионного тока на исследуемом образце.

Благодарность

Данная работа выполнена в рамках грантового финансирования Министерством науки и Высшего образования Республики Казахстан (Грант № АР13068552).

Список использованной литературы

[1] Kazakhstan Material Testing Tokamak KTM Construction (2022), https://www.nnc.kz/ru/news/show/348.

[2] Патент РК на полезную модель № 2080. Имитационный стенд с плазменно-пучковой установкой / Колодешников А.А., Зуев В.А., Гановичев Д.А., Туленбергенов Т.Р. и др. – опубл. 15.03.2017, Бюл. № 5.

[3] V. Kurnaev, I. Vizgalov, K. Gutorov, T. Tulenbergenov, I. Sokolov, A. Kolodeshnikov, V. Ignashev, V. Zuev, I. Bogomolova, N. Klimov. Investigation of plasma-surface interaction at plasma beam facilities. - Journal of Nuclear Materials, 2015, vol.463, p.228-232. http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.12.076

[4] Туленбергенов Т.Р., Скаков М.К., Миниязов А.Ж., Соколов И.А., Кайырды Г.К. Роль имитационного стенда с плазменно-пучковой установкой в исследованиях плазменно-поверхностного взаимодействия. – Вестник НЯЦ РК, 2019. – Вып.4(80). – С.51-58.

[5] Тамм И. Е. Основы теории электричества. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.