

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.01

ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭЦР-ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ С РЕЗОНАНСНОЙ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРОЙ ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЕ

© 2024 г. Д. Н. Селезнев^а, *, А. Б. Зарубин^а,
Н. Н. Виноградский^а, К. Е. Прянишников^а, Т. В. Кулевой^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: Selesnev@itep.ru

Поступила в редакцию 20.06.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принята к публикации 02.08.2023 г.

В рамках проекта BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator), предназначенного для решения различных задач, создается инжекционный комплекс на базе нескольких ионных источников. Одной из задач является много пучковое облучение конструкционных материалов ядерных и термоядерных энергетических установок для анализа их радиационной стойкости. Тяжелые (Fe) и легкие (H₂/He) ионные пучки будут облучать мишень в одной и той же камере одновременно. Для генерации пучков легких ионов разрабатывается компактный ионный источник на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР источник). Статья содержит описание исследований зависимостей работы ЭЦР-источника легких ионов с резонансной разрядной камерой от давления рабочего газа, величины и распределения магнитного поля, а также масс-зарядовый спектр пучка ионов гелия.

Ключевые слова: многопучковое облучение, тяжелые и легкие ионы, электронно-циклотронный резонанс, магнетрон, плазма

DOI: 10.56304/S2079562923030302

ВВЕДЕНИЕ

При создании новых материалов ядерных и термоядерных реакторов, способных выдерживать экстремальные радиационные, термические и механические нагрузки при эксплуатации требуется проводить их аттестацию. Аттестацию образцов проводят в условиях близких к реальным условиям эксплуатации (реакторное облучение), что требует значительного времени, а также приводит к высокой наведенной радиационной активности материалов, что значительно затрудняет последующие исследования образцов. Именно поэтому для проведения предаттестационных исследований востребованы методы экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов, такие как имитационные эксперименты по облучению материалов ускоренными пучками тяжелых ионов. Облучение тяжелыми ионами позволяет инициировать каскадное рождение структурных дефектов, аналогичное тому, что происходит при реакторном облучении [1]. Для полноты воспроизведения процессов, происходящих в материалах ядерных энергетических установок при их эксплуатации, применяют технологию одновременного облучения материала тремя ионными пучками. Ионы Fe используются в качестве

основного радиационного дефектообразующего пучка, а ионы водорода и гелия имплантируются в область дефектообразования, т.к. в реальных условиях нейтронного облучения в результате реакций ядерной трансмутации в материалах образуются газообразные примеси: гелий и водород, которые накапливаются одновременно с накоплением радиационных дефектов. В НИЦ “Курчатовский институт”—ИТЭФ ведется разработка такой многофункциональной установки BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator) [2]. Эта статья представляет описание ЭЦР ионного источника легких ионов и результаты по генерации пучка ионов гелия.

ТРЕБОВАНИЯ К ИСТОЧНИКУ ЛЕГКИХ ИОНОВ

Согласно требованиям имитационных экспериментов была определена величина тока на мишени: гелий (He⁺) 50 мкА; протоны (H⁺) 100 мкА [1, 3]. Учитывая особые условия транспортировки пучка от источника до мишени (предполагается использовать имеющееся оборудование: фильтрующий магнит, вакуумные трубопроводы и др.) из-за возможных его потерь, необходимо иметь

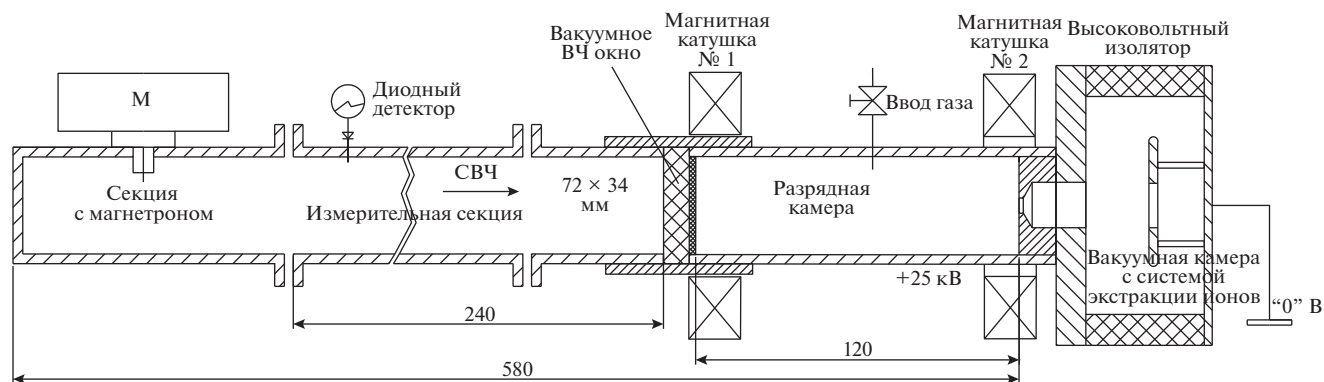


Рис. 1. Схема лабораторного ЭЦР источника ионов.

запас по току пучка. Были выбраны значения на выходе источника: гелий — 500 мкА; протоны — 1000 мкА. Источник легких ионов устанавливается на высоковольтной платформе (ВП), находящейся под потенциалом $U = 300$ кВ относительно земли. Размеры ВП ограничены размерами экспериментального зала, а это требует компактности источника; что обуславливает минимизацию конструктивных элементов (отказ от общепринятой схемы ВЧ питания ЭЦР-источников (отсутствие циркулятора, штыревого фазовращателя, ступенчатого перехода, направленного ответвителя).

КОНСТРУКЦИЯ ЭЦР-ИСТОЧНИКА

Структурная схема лабораторного ЭЦР источника ионов представлена на рис. 1. СВЧ-колебания генерируются магнетроном марки LG 2M213 с выходной средней мощностью до 600 Вт на частоте 2.45 ГГц для получения плазмы в разрядной камере. Ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = +25$ кВ; режим работы импульсный с частотой повторе-

ния до 2 Гц и длительностью импульса, регулируемым в диапазоне $t = 400\text{--}1000$ мкс.

Нагрузкой для магнетронного генератора служит резонатор, состоящий из трех частей: разрядной камеры; измерительной секции и секции резонатора для установки магнетрона. Полная длина резонатора, изготовленного из прямоугольного волновода Al—Mg сплава сечением 72×34 мм, составляет 580 мм. Возбуждение колебаний типа Н103 в резонаторе осуществляется магнетроном через штыревую антенну.

Вакуумное высокочастотное окно, отделяющее разрядную камеру от остального объема резонатора, изготовлено из фторопласта закрытого алюмооксидной керамикой и обеспечивает передачу СВЧ мощности без заметных потерь в разрядную камеру. Длина разрядной камеры между вакуумным высокочастотным окном и плазменным электродом составляет $\lambda_{\text{в}}/2$ ($\lambda_{\text{в}}$ — длина волны в волноводе). С наружной стороны стенок разрядной камеры установлены две соленоидальные магнитные катушки, формирующие магнитную ловушку вдоль оси резонатора. Величину “зеркального” отношения $B_{\text{макс}}/B_{\text{мин}}$ можно менять от максимальной 1.33 и до 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве рабочего газа был выбран гелий, как более сложный в работе газ в сравнении с водородом. Параметрами исследований ионного источника были: полный ток пучка, масс-зарядовый спектр, устойчивость работы источника. Исследовались зависимости работы источника от давления рабочего газа, величины и распределения магнитного поля.

Зависимость величины компоненты тока гелия (He^+) от давления в разрядной камере представлена на рис. 2.

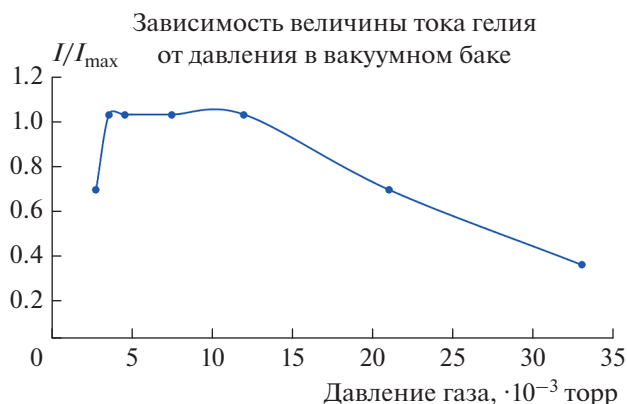


Рис. 2. Зависимость величины компоненты тока гелия от давления в разрядной камере.

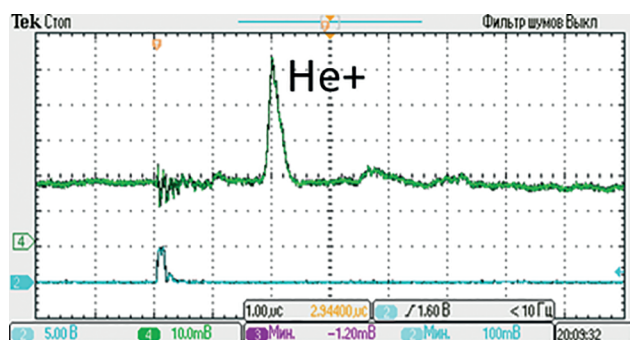


Рис. 3. Масс-зарядовый спектр пучка ионов гелия.

Из проведенных исследований установлено, что максимальная величина компоненты тока гелия находится в диапазоне давлений $p = (1.4-9) \cdot 10^{-3}$ торр. При этом поток рабочего газа составляет $(0.3-3) \text{ см}^3/\text{мин}$. При более низком давлении разряд не зажигается, а при более высоком происходит повышенная рекомбинация ионов. Масс-зарядовый спектр пучка ионов, измеренный времяпролетным методом [4] представлен на рис. 3.

Измерения показали наличие в пучке до 80% ионов гелия (He^+) при полном токе пучка 3 мА. Продолжительная предварительная откачка до напуска рабочего газа позволяет повысить содержание ионов рабочего газа.

При изучении устойчивости работы источника было установлено, что на стадии поджига разряда первоначальный высоковольтный пробой газа происходит в области максимальной напряженности высокочастотного электрического поля. Эта область находится в центре разрядной камеры. Далее на стадии развития и горения разряда процессы передачи энергии в плазму разряда переходят в область высокочастотного вакуумного окна. После первоначального пробоя и появления плазмы в разрядной камере, последняя перестает быть резонансной, и образовавшаяся плазма не позволяет распространяться высокочастотному полю внутрь разрядной камеры.

Проведены исследования влияния величины и распределения магнитного поля на поджиг и горение разряда. Установлено, что стабильный пробой (поджиг) и устойчивое горение происходит при распределении магнитного поля, представленного на рис. 4.

Причем “зеркальное отношение” может лежать в диапазоне $1.3-1$, а величина магнитного поля в области высокочастотного окна должна приближаться к номинальной ($B_{\text{ном}} = 875 \text{ Гс}$). Также было установлено, что, для устойчивой работы источника при формировании магнитного поля достаточно устанавливать его величину с точностью до 25–30% от номинальной.

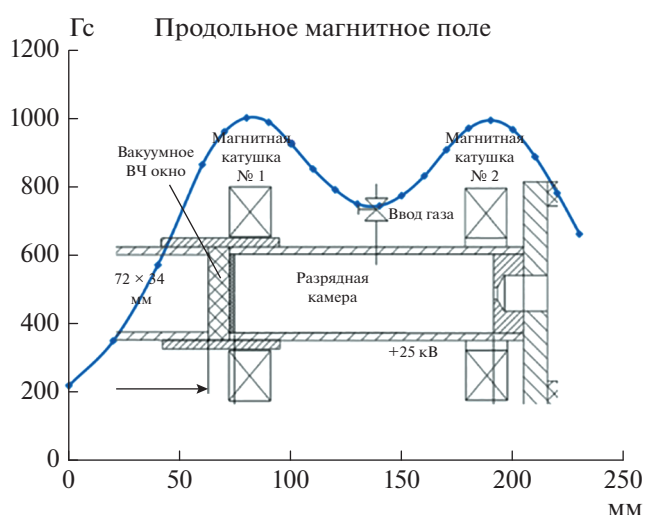


Рис. 4. Продольное распределение магнитного поля в разрядной камере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы зависимости параметров (полный ток, масс-зарядовый спектр пучка, устойчивость зажигания и горение разряда) ионного источника с прямоугольной разрядной камерой с магнитными катушками от давления газа, величины и распределения магнитного поля. Источник стабильно работает при давлении в разрядной камере $p = (1.4-9) \cdot 10^{-3}$ торр.

Для устойчивой работы источника при формировании магнитного поля достаточно устанавливать его величину с точностью до 25–30% от номинальной, величину “зеркального отношения” в диапазоне $1.3-1$. Номинальная величина магнитного поля в районе ВЧ окна приближалась к $B_{\text{ном}} = 875 \text{ Гс}$. Измерения масс-зарядового состава пучка показали наличие ионов гелия до 80%.

Ионный источник планируется использовать в проектах BELA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Fedin P.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686 (1). P. 012073.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1686/1/012073>
2. Kulevoy T.V. // Proc. LINAC2018. 2018. P. 349.
3. Taller S. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B. 2017. V. 412. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.08.035>
4. Barabin S. et al. // Proc. DIPAC2003. 2003. P. 158.

Laboratory ECR Source of Light Ions with a Resonant Discharge Chamber for Installation on a High-Voltage Platform

D. N. Seleznev^{1, *}, A. B. Zarubin¹, N. N. Vinogradskii¹, K. E. Pryanishnikov¹, and T. V. Kulevoi¹

¹*National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia*

**e-mail: Seleznev@itep.ru*

Received June 20; revised July 11, 2023; accepted August 2, 2023

Abstract—Within the framework of the BELA project (Based on ECR ion source Linear Accelerator), designed to solve various problems, an injection complex based on several ion sources is being created. One of the tasks is multibeam irradiation of structural materials of nuclear and thermonuclear power plants to analyze their radiation resistance. Heavy (Fe) and light (H₂/He) ion beams will irradiate the target in the same chamber simultaneously. To generate beams of light ions, a compact ion source based on electron cyclotron resonance (ECR source) is being developed. The paper contains description of the studies of the dependences of the operation of an ECR source of light ions with a resonant discharge chamber on the pressure of the working gas, the magnitude and distribution of the magnetic field, as well as the mass-charge spectrum of a helium-ion beam.

Keywords: multibeam irradiation, heavy and light ions, electron cyclotron resonance, magnetron, plasma