

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.01

ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭЦР-ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ

© 2023 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

Поступила в редакцию 25.07.2022 г.

После доработки 25.07.2022 г.

Принята к публикации 02.08.2022 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 многопучковое облучение конструкционных материалов ядерных и термоядерных энергетических установок для анализа их радиационной стойкости. Тяжелые (Fe) и легкие (H/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 конструкции ЭЦР-источника легких ионов и предварительные результаты по генерации пучка ионов гелия.

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

DOI: 10.56304/S207956292205044X

ВВЕДЕНИЕ

При создании новых материалов ядерных и термоядерных реакторов, способных выдерживать в ходе эксплуатации экстремальные радиационные, термические и механические нагрузки требуется проводить их исследования на соответствие таким нагрузкам. Исследования 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 исследований востребованы методы экспресс-анализа радиационной стойкости конструкционных материалов, в частности такие как имитационные эксперименты с облучением материалов ускоренными пучками тяжелых ионов. Облучение тяжелыми ионами позволяет инициировать каскадное рождение структурных дефектов, аналогичное тому, что происходит при реакторном облучении [1]. Так как 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, для полноты воспроизведения процессов, происходящих в материалах ядерных энергетических установок при их эксплуатации, применяют технологию одновременного облучения материала двумя и даже тремя

ионными пучками. При исследовании сталей пучки ионов железа используются в качестве основного радиационного дефектообразующего пучка, а ионы водорода и гелия имплантируются в область дефектообразования. В НИЦ “Курчатовский институт” ведется разработка многофункциональной установки BELA (Based on ECR ion source Linear Accelerator) [2], способной обеспечить облучение исследуемого образца. Эта статья представляет описание разрабатываемого для данной установки ЭЦР ионного источника легких ионов и первые результаты, полученные с гелием.

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.

Магнетрон был выбран в качестве источника СВЧ-мощности в сантиметровом диапазоне длин волн благодаря тому, что он обладает высоким коэффициентом полезной мощности и способностью работать на несогласованную нагрузку с большим коэффициентом стоячей волны [3, 4]. Нагрузкой для магнетронного генератора служит резонатор, состоящий из трех частей: вакуумной разрядной камеры; измерительной секции и секции резонатора для установки магнетрона. Полная длина резонатора, изготовленного из прямоугольного

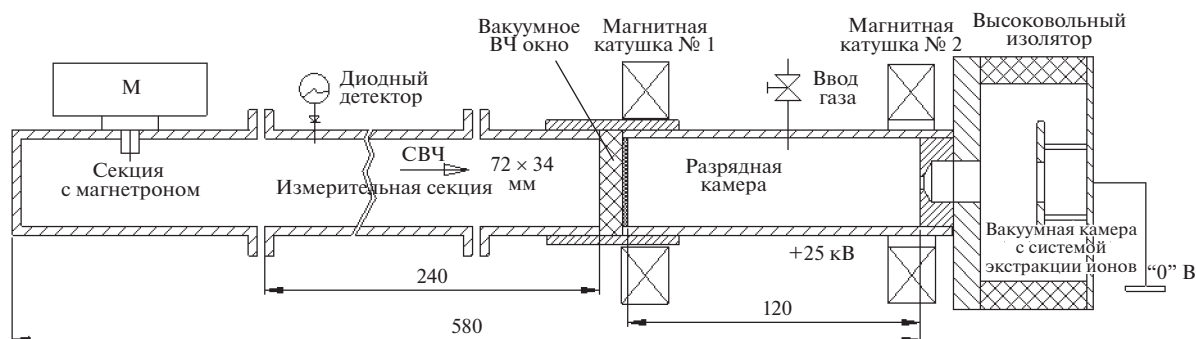


Рис. 1. Схема лабораторного ЭЦР источника ионов.

волновода Al–Mg сплава сечением 72×34 мм, составляет 580 мм. Возбуждение колебаний типа Н103 в резонаторе осуществляется через штыревую антенну. Глубина погружения штыревой антенны в волновод и расстояние от стенки до места включения подбираются в процессе настройки резонансной системы на получение наибольшей мощности в разрядной камере.

С помощью диодного детектора проводились измерения продольного распределения напряженности электрического поля в резонаторе во время настройки согласования магнетронного генератора с резонатором. Вакуумное высокочастотное окно отделяет разрядную камеру от остального объема резонатора, изготовленное из фторопласта, закрыто алюмооксидной керамикой и обеспечивает передачу СВЧ мощности без заметных потерь в разрядную камеру, не нарушая высокого вакуума в системе ($\sim 10^{-6}$ торр). Длина разрядной камеры между вакуумным высокочастотным окном и плазменным электродом составляет $\lambda_v/2$ (λ_v — длина волны в волноводе). С наружной стороны

стенки разрядной камеры установлены две соленоидальные магнитные катушки, формирующие магнитную ловушку вдоль оси резонатора. Измеренное продольное распределение магнитного поля в разрядной камере имеет вид, представленный на рис. 2.

Величина магнитного поля в центре разрядной камеры регулируется величиной тока в обмотках магнитных катушек и расстоянием между ними. Максимальная величина “зеркального” отношения составляет $B_{\text{макс}}/B_{\text{мин}} = 1.33$. Сближая магнитные катушки друг к другу, “зеркальное” отношение можно уменьшить до единицы, тем самым получить распределение магнитного поля, соответствующее одиночному соленоиду. Такое распределение позволяет реализовать режим ВЧ источника.

Система экстракции пучка состоит из плазменного электрода, находящегося под высоким (до +25 кВ) потенциалом, и заземленного вытягивающего электрода. Ввод газа в вакуумную часть волновода производится с помощью натекателя.

ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В первых испытаниях источник работал в следующем режиме: длительность импульса ионного тока совпадала с длительностью СВЧ мощности и равнялась 1 мс; частота следования импульсов до 2 Гц; при этом полный ток пучка составил 7 мА. В первых экспериментах с пучком рабочим газом был гелий. Зажигание разряда и устойчивая работа источника происходила при давлении в вакуумной камере $p = 7 \cdot 10^{-6}$ торр. Полный ток пучка (рис. 3) был измерен цилиндром Фарадея, установленным на расстоянии 200 мм от заземленного вытягивающего электрода.

На универсальном испытательном стенде [5] масс-анализирующим магнитом был измерен масс зарядовый состав пучка гелия, в котором помимо рабочего вещества наблюдаются компонен-

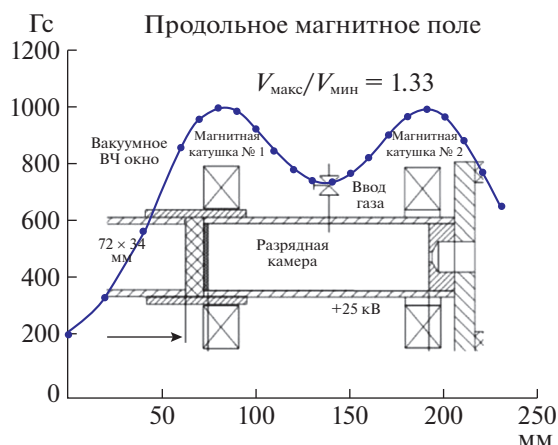


Рис. 2. Продольное распределение магнитного поля в разрядной камере.

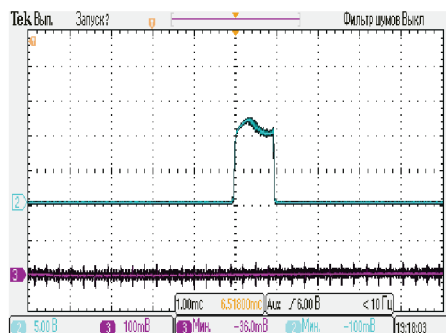
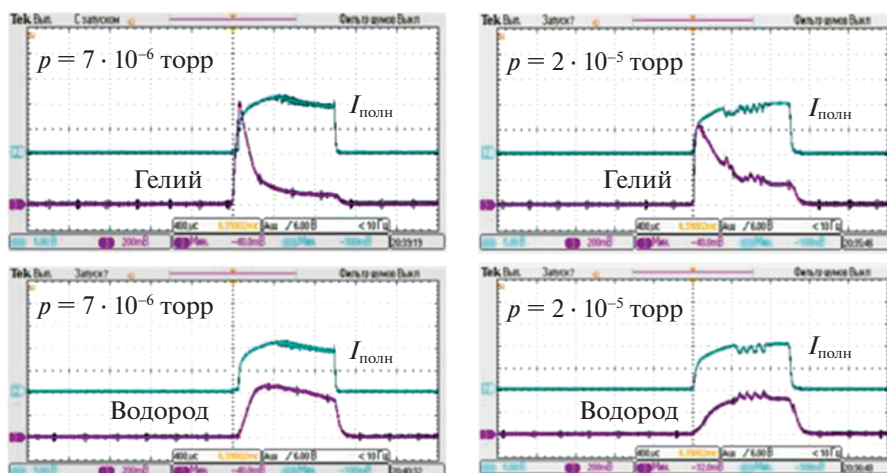


Рис. 3. Полный ток пучка ионов гелия

Рис. 4. Зависимость формы тока для компонент пучка He^+ ; H^+ от времени при различном давлении в вакуумной камере.

ты: (H^+ ; H_2^+ ; He^{++} ; C^+ ; N^+ ; O^+). Была исследована зависимость формы тока компонент пучка от давления газа в вакуумной камере. Зависимость формы тока для компонент пучка He^+ и H^+ от давления в вакуумной камере представлена на рис. 4.

Установлено, что зажигание разряда происходит на рабочем газе (гелии). Наблюдается заметное снижение интенсивности пучка ионов гелия в течении импульса из-за постепенного включения в разряд остаточных газов в разрядной камере. Величина полного тока остается при этом почти неизменной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан компактный импульсный ЭЦР-источник легких ионов на основе прямоугольного резонатора с двумя магнитными катушками с частотой следования импульсов до 2 Гц, длительностью импульса 1 мс. Получен полный ток пучка

ионов гелия 7 мА. Испытания показали стабильную работу источника в течение более чем трех часов. Интенсивности ионного пучка гелия хватает для проведения имитационных экспериментов. 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.
2. Kulevoy T.V. // Proc. 29th Linear Accelerator Conf. (LINAC'2018). 2018. P. 349.
3. Андрушко Л.М., Федоров Н.Д. Электронные и квантовые приборы СВЧ. 1981. Москва: Радио и связь.
4. Диденко А.Н., Зверев Б.В. СВЧ-энергетика. 2000. Москва: Наука.
5. Barabin S. et al. // Proc. DIPAC-2002. 2002. P. 158.

Laboratory ECR Source of Light Ions

D. N. Seleznev^{1, *}, A. B. Zarubin¹, N. N. Vinogradskii¹, K. E. Pryanishnikov¹, and T. V. Kulevoy¹

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

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

Received July 25, 2022; revised July 25, 2022; accepted August 2, 2022

Abstract—Within the framework of the BELA (Based on the ECR ion source Linear Accelerator) project, designed to solve various problems, an injection complex based on several ion sources is being created. One of the tasks is multi-beam irradiation of structural materials of nuclear and thermonuclear power plants to analyze their radiation resistance. Heavy (Fe) and light (H/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. This paper contains a description of the design of the ECR, that is, the source of light ions and preliminary results on the generation of a helium ion beam.

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