

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.01

ЛАБОРАТОРНЫЙ ИСТОЧНИК ЛЕГКИХ ИОНОВ С РАЗРЯДНОЙ
КАМЕРОЙ НА ОСНОВЕ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО ВОЛНОВОДА
ДЛЯ УСТАНОВКИ НА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ПЛАТФОРМЕ

© 2025 г. Д. Н. Селезнев^а, *, А. Б. Зарубин^а, Н. Н. Виноградский^а,
К. Е. Прянишников^а, П. А. Федин^а, Т. В. Кулевой^а

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

*E-mail: Selesnev@itep.ru

Поступила в редакцию 30.05.2024 г.

После доработки 30.05.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

Курчатовский комплекс теоретической и экспериментальной физики НИЦ “Курчатовский институт” разрабатывает источник ионов многопучковой установки для проведения экспериментов по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов. Воспроизведение процессов, происходящих в реакторе, требует облучения образцов конструкционных материалов двумя или тремя ионными пучками [Fedin P.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. P. 012073]. Облучение одним из видов тяжелых ионов (Fe^{2+} , Ti^{2+} , Co^{2+} и др.) и одним из типов легких ионов (H^+ / He^+) мишени будет происходить в одной и той же камере одновременно. Для генерации пучков легких ионов разрабатывается компактный ионный источник с разрядной камерой на основе запредельного волновода, устанавливаемый на высоковольтной платформе. Статья содержит описание конструкции источника легких ионов и предварительные результаты по генерации пучка ионов гелия.

Ключевые слова: многопучковое облучение, тяжелые и легкие ионы, магнетрон, плазма

DOI: 10.56304/S2079562925010208

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время востребованы методы экспресс-анализа радиационной стойкости новых конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов [1]. Такими методами являются имитационные эксперименты по облучению материалов ускоренными пучками тяжелых ионов. 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 [2]. Для полноты воспроизведения процессов, происходящих в материалах ядерных энергетических установок при их эксплуатации, применяют технологию одновременного облучения материала ионными пучками. Ионы Fe используются в качестве основного радиационного дефектообразующего пучка, а ионы водорода и гелия имплантируются в область дефектообразования от основного пучка. В НИЦ “Курчатовский институт” – ККТЭФ ведется разработка двухпучковой установки на базе ускорителя ТИПр. Для генерации пучка гелия (водорода) разрабатывается ионный источник легких ионов с разрядной камерой на ос-

нове запредельного волновода для установки на высоковольтной платформе. Эта статья представляет описание ионного источника легких ионов и результаты по генерации пучка ионов гелия.

Общие требования к ионному источнику, который должен размещаться на высоковольтной платформе, были сформулированы в [3]. Из литературы известно [4], что более высокую плотность плазмы можно получить с помощью СВЧ разряда в более сильных магнитных полях, и в этом случае ЭЦР не является главным условием генерирования плазмы. Было решено реализовать работу источника в режиме СВЧ разряда. С целью дальнейшего увеличения компактности источника, описанного в [3], и упрощения его эксплуатации было принято решение о замене в нем резонансной прямоугольной разрядной камеры на цилиндрическую и соленоидальные магнитные катушки на кольцевые постоянные магниты.

КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА

Структурная схема лабораторного источника легких ионов представлена на рис. 1. СВЧ-колебания генерируются магнетроном марки LG 2M213 с

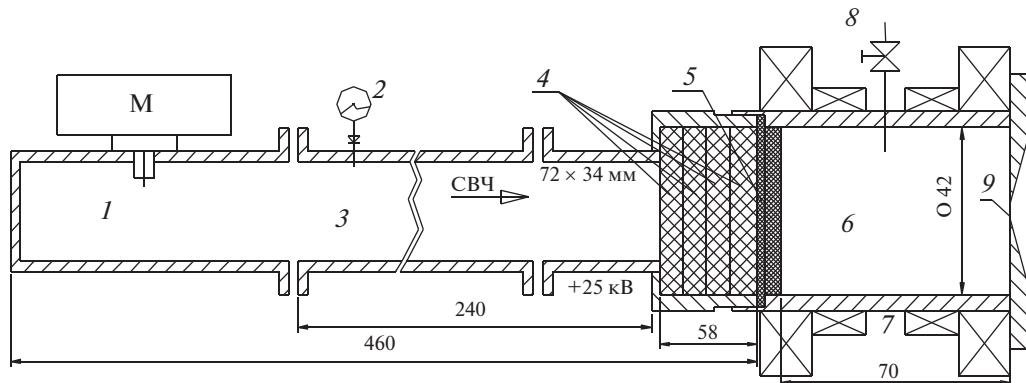


Рис. 1. Схема лабораторного источника ионов: 1 – секция с магнетроном; 2 – диодный детектор; 3 – измерительная секция; 4 – согласующий участок с керамикой $\epsilon = 8$; 5 – вакуумное высокочастотное окно с нитридом бора; 6 – разрядная камера Ø42 мм; 7 – постоянные магниты; 8 – ввод газа; 9 – плазменное отверстие диаметром 4 мм.

выходной средней мощностью до 600 Вт на частоте 2.45 ГГц для получения плазмы в разрядной камере. Нагрузкой для магнетронного генератора служит волновод, состоящий из четырех частей: цилиндрической разрядной камеры (6) с внутренним диаметром 42 мм; цилиндрического участка диаметром 42 мм, заполненного диэлектриком (4); измерительной секции (3) и секции для установки магнетрона (1), две последние секции выполнены на основе прямоугольного волновода 72 × 34 мм. Возбуждение колебаний типа Н10 в прямоугольном волноводе осуществляется магнетроном через штыревую антенну. Выбор размеров цилиндрической разрядной камеры определялся внутренним размером кольцевых постоянных магнитов. Минимальная длина разрядной камеры была определена из конструктивных соображений, так чтобы на длине камеры можно было разместить кольцевые магниты, создающие продольную магнитную ловушку. Длина разрядной камеры составляет 70 мм. Цилиндрическая разрядная камера с внутренним диаметром 42 мм для рабочей частоты 2.45 ГГц является запредельным волноводом. СВЧ мощность, поступающая на вход такой разрядной камеры, затухает по экспоненциальному закону. Вход разрядной камеры отделен от подводящего СВЧ мощность волновода вакуумным высокочастотным окном (5), изготовленным из керамики ВК-100 и закрытом керамикой из нитрида бора (BN) со стороны плазмы.

Между прямоугольным волноводом и цилиндрической разрядной камерой был установлен участок цилиндрического волновода, заполненного диэлектриком (керамикой с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 8$), длиной λ_b (λ_b – длина волны в волноводе). Такой цилиндрический волновод с выбранным диэлектриком не является уже запредельным и его наличие облегчает зажигание разряда и передачу СВЧ мощности в плазму разряда.

При изучении устойчивости работы источника было установлено, что на стадии поджига разряда первоначальный пробой происходит в области максимальной напряженности высокочастотного электрического поля. Эта область должна находиться на поверхности, обращенной в разрядную камеру, высокочастотного окна. Процессы передачи энергии в плазму при дальнейшем развитии и горении разряда происходят также в этой области. Цилиндрический участок, с диэлектрическим заполнением, длиной λ_b позволяет конструктивно соединить прямоугольный волновод с цилиндрической разрядной камерой и обеспечить максимальную напряженность высокочастотного электрического поля в области высокочастотного окна. Полная длина ионного источника составляет 590 мм.

С наружной стороны стенок разрядной камеры установлены два кольцеобразных неодимовых магнита ($Nd_2Fe_{14}B$) марки N35, формирующие магнитную ловушку вдоль оси резонатора. Измененная величина продольной составляющей магнитного поля в центре на продольной оси колец постоянных магнитов составляла $B = 1700$ Гс. Эта величина значительно превосходит величину магнитного поля, соответствующую ЭЦР режиму работы источника для частоты 2.45 ГГц. Между кольцевыми магнитами вокруг разрядной камеры размещены дополнительно 14 прямоугольных постоянных магнитов с продольной намагниченностью, позволяющие формировать требуемое магнитное “зеркальное” отношение B_{\max}/B_{\min} . Кольцо магнита расположено в районе ВЧ окна устанавливается так, чтобы плоскость, проходящая через центр кольца совпадала с плоскостью керамики из BN. Второе кольцо магнита устанавливается так, чтобы плоскость, проходящая через центр кольца совпадала с плоскостью отверстия в плазменном электроде. Расстояние между магнитными кольцами выбирается исходя из получения желаемой величины “зеркального” отношения, в

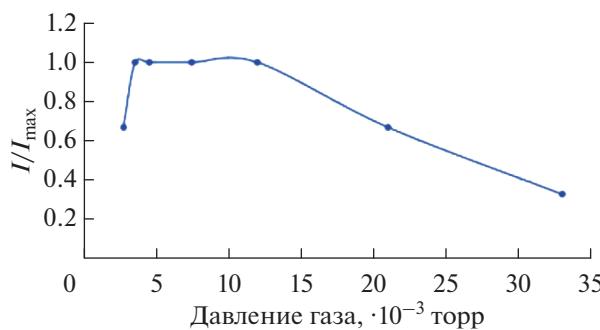


Рис. 2. Зависимость величины компоненты тока гелия от давления в разрядной камере.

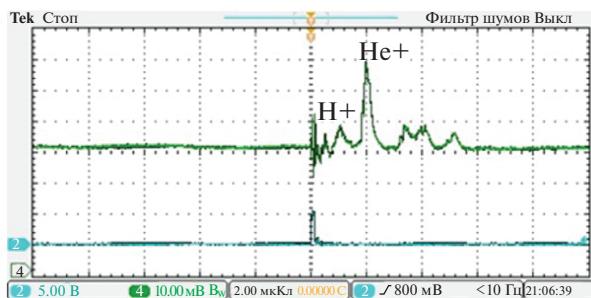


Рис. 3. Масс-зарядовый спектр пучка ионов гелия.

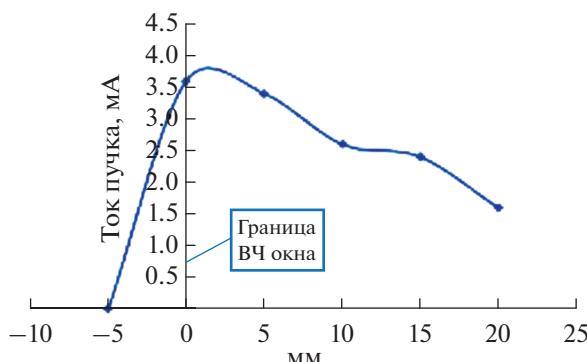


Рис. 4. Зависимость тока пучка от расположения максимума продольной составляющей магнитного поля относительно высокочастотного окна.

нашем случае “зеркальное” отношение составляет 1.2. Ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}} = +25$ кВ; режим работы импульсный с частотой повторения до 2 Гц и длительностью импульса, регулируется в диапазоне $t = 400-1000$ мкс.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве рабочего газа был выбран гелий. Из проведенных исследований установлено, что мак-

имальная величина компоненты тока гелия находится в диапазоне давлений в разрядной камере $p = (1.4-9) \cdot 10^{-3}$ торр. Зависимость величины компоненты тока гелия от давления в разрядной камере представлена на рис. 2. При более низком давлении разряд не зажигается, а при более высоком происходит повышенная рекомбинация ионов.

Масс-зарядовый спектр пучка ионов, измеренный времепролетным методом [5], представлен на рис. 3.

Измерения показали наличие в пучке до 50% ионов гелия (He^+) при полном токе пучка 5 мА. Приведенный на рис. 3 спектр был измерен после непродолжительной (около 4 ч) откачки с атмосферного давления. Более продолжительная предварительная откачка до напуска рабочего газа позволяет повысить содержание ионов рабочего газа.

При изучении устойчивости работы источника было установлено, что замена керамики из нитрида бора, закрывающая высокочастотное окно, на другую керамику, например ВК-100 или ВК-94, приводит к быстрому затуханию разряда, а иногда даже вообще его не зажиганию. Известно, что нитрид бора обладает повышенным выходом вторичных электронов [6], и, возможно, это свойство способствует развитию разряда.

Проведены исследования зависимости тока пучка от расположения максимума продольной составляющей магнитного поля относительно высокочастотного окна. Данная зависимость приведена на рис. 4.

Было установлено, что для более устойчивого зажигания и горения разряда необходимо точно выбирать расположение максимума магнитного поля (центр магнитного кольца) относительно границы высокочастотного окна. Эта точность зависит от толщины кольца и в нашем случае составляет $+/-2.5$ мм при толщине магнитного кольца 25 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы зависимости параметров (полный ток, масс-зарядовый спектр пучка, устойчивость зажигания и горение разряда) ионного источника с цилиндрической разрядной камерой на основе запредельного волновода с постоянными магнитами. Источник стабильно работает при давлении в разрядной камере $p = (1.4-9) \cdot 10^{-3}$ торр.

Величина достигнутого полного тока составила 5 мА. Измерения масс-зарядового состава пучка показали наличие ионов гелия не менее 50%. Для устойчивой работы источника требуется закрывать высокочастотное окно керамикой из нитрида бора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

- Nelson R., Mazer D., Hudson J. // J. Nucl. Mater. 1970. V. 37. P. 1–12.

2. *Fedin P.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. P. 012073.*
3. Селезнев Д.Н., Зарубин А.Б., Виноградский Н.Н., Прянишников К.Е., Кулевой Т.В. // Ядерн. физ. инжинир. 2024. Т. 15 (4). С. 372–375 [*Seleznev D.N., Zarubin A.B., Vinogradskii N.N., et al. // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86. P. 2275–2277*].
4. Браун Я. Физика и технология источников ионов. 1998. Москва: Мир.
5. Barabin S., Batalin V., Kozlov A., Kulevoy T., et al. // Proc. DIPAC-2003. Mainz, Germany. 2003. P. 158–160.
6. Tuske O. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. P. 5.

Laboratory Source of Light Ions with a Discharge Chamber Based on an Out-of-Limit Waveguide for Installation on a High-Voltage Platform

D. N. Seleznev¹, *, A. B. Zarubin¹, N. N. Vinogradsky¹,
K. E. Pryanishnikov¹, P. A. Fedin¹, and T. V. Kulevoy¹

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

*e-mail: Selesnev@itep.ru

Received May 30, 2024; revised May 30, 2024; accepted June 10, 2024

Abstract—The Kurchatov Complex of Theoretical and Experimental Physics of the National Research Centre “Kurchatov Institute” is developing a multi-beam facility for performing experiments on express analysis of the irradiation resistance of structural materials of nuclear and fusion reactors. Reproduction of the processes occurring in the reactor requires irradiation of samples of structural materials with two or three ion beams [*Fedin P.A. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1686. P. 012073.*]. Irradiation of one type of heavy ions (Fe^{2+} , Ti^{2+} , Co^{2+} , etc.) and one type of light ions (H^+ / He^+) of the target will occur in the same chamber simultaneously. To generate beams of light ions, a compact ion source with a discharge chamber based on an extremity waveguide, installed on a high-voltage platform, is being developed. The paper contains a description of the design of a light ion source and preliminary results on the generation of a helium ion beam.

Keywords: multi-beam irradiation, heavy and light ions, magnetron, plasma