

## ЭЦР-источник легких ионов

К.Е. Прянишников\*, Д.Н. Селезнев, А.Б. Зарубин, Н.Н. Виноградский, П.А. Федин,  
Т.В. Кулевой

*NRC "Kurchatov Institute", Moscow, Russia*

*\*pryanishnikovk@bk.ru*

**Аннотация.** В статье представлено описание разработки и настройки двух конструкций источников ионов, генерирующих плазму на частоте 2.45 ГГц, работающих в режимах с ЭЦР-разрядом и СВЧ разрядом. Рабочий газ источников – гелий или водород. Система экстракции и формирования пучка, в настоящее время, представляет собой двухэлектродную оптику, диаметр эмиссионного отверстия 4 мм. При ускоряющем напряжении 25 кВ в импульсном режиме ток ионного пучка составлял 7 мА (He<sup>+</sup>) при доле ионов гелия до 70% и 14 мА (H<sup>+</sup>) при доле ионов протия до 90%.

**Ключевые слова:** ионный источник, электронно-циклотронный резонанс, запредельный волновод.

### 1. Введение

В НИЦ «Курчатовский институт» разрабатывается ионный источник с генерирующей плазму на частоте 2.45 ГГц и работающий в режимах с ЭЦР-разрядом либо СВЧ разрядом для получения легких ионов (гелия или водорода). Такой источник предполагается использовать в многопучковой установке для выполнения экспериментов по экспресс-анализу радиационной стойкости конструкционных материалов ядерных и термоядерных реакторов [1, 2]. Ионы гелия и водорода имплантируются в конструкционные стали после нанесения повреждений ускоренным пучком железа, что является имитацией процессов, происходящих в реакторах под действием нейтронного облучения.

Для получения ионов гелия или водорода можно использовать источники плазменные [3], источники Пеннинга [4], на основе плазмы ВЧ [5] и ЭЦР разрядов [6]. Выбор источника с использованием ЭЦР-разряда обусловлен возможностью получить пучок достаточной для экспериментов интенсивности и малым эмиттансом, что позволяет использовать пучок для дальнейшего ускорения. Подобные источники обладают длительным периодом работы между сеансами обслуживания и большей стабильностью работы. Компактность также является важным фактором при выборе ионного источника. Были разработаны и исследованы два варианта конструкций ионного источника.

### 2. Конструкция источника ионов с резонансной разрядной камерой

Источник состоит (см. Рис. 1) из секции с магнетроном, измерительной секции и разрядной камеры. СВЧ-мощность генерируется магнетроном модели LG 2M213 с выходной средней мощностью до 600 Вт на частоте 2.45 ГГц для создания плазмы в разрядной камере. Ускоряющее напряжение составляет 25 кВ, режим работы источника импульсный с частотой повторения до 2 Гц и длительностью импульса 475 мкс.

Нагрузкой магнетронного генератора служит резонатор, состоящий из трех частей: разрядной камеры, измерительной секции и секции резонатора для установки магнетрона. Полная длина ионного источника, изготовленного на основе прямоугольного волновода из сплава Al-Mg с сечением 72×34 мм составляет 580 мм. Возбуждение колебаний типа  $H_{103}$  осуществляется магнетроном через штыревую антенну.

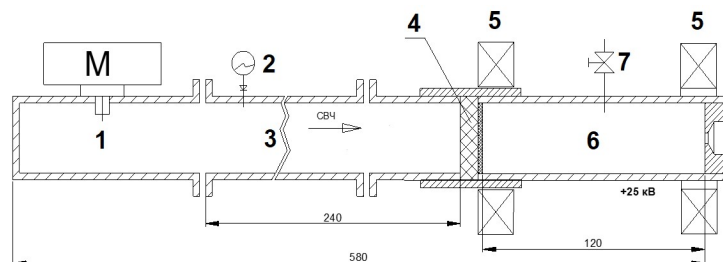


Рис. 1. Схема лабораторного источника ионов: 1 – секция с магнетроном; 2 – диодный детектор; 3 – измерительная секция; 4 – вакуумное высокочастотное окно; 5 – магнитные катушки; 6 – разрядная камера; 7 – ввод газа.

СВЧ-мощность поступает в разрядную камеру через вакуумное высокочастотное окно, изготовленное из фторопласта, закрытого алюмооксидной керамикой. Первоначальный поджиг плазменного разряда происходит в центральной области разрядной камеры, а дальнейшее горение поддерживается процессами в районе ВЧ окна. С наружной стороны стенок разрядной камеры установлены две соленоидальные магнитные катушки, формирующие магнитную ловушку вдоль оси резонатора. Величина «зеркального» соотношения  $B_{max}/B_{min}$  составляет 1.33.

### 3. Конструкция источника ионов с разрядной камерой на основе запердельного волновода

Схема ионного источника на основе разрядной камеры в виде запердельного круглого волновода с внутренним диаметром 42 мм представлена далее (см. Рис. 2). Нагрузкой магнетрона помимо секции резонатора для установки магнетрона, измерительной секции, разрядной камеры служит дополнительный согласующий участок круглого волновода, заполненный диэлектриком (керамикой с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 8$ ).

Длина участка согласования совпадает с длиной волны в волноводе  $\lambda_{в}$ . Первоначальный поджиг плазменного разряда происходит по поверхности ВЧ окна, а дальнейшее горение поддерживается процессами в районе ВЧ окна. ВЧ окно выполнено из нитрида бора, что обеспечивает стабильную работу источника. Моделирование распределения электрического поля в двух источниках в момент поджига разряда представлено далее (см. Рис. 3 и Рис. 4).

Расчеты показывают, что максимальная величина электрического ВЧ поля до поджига разряда достигается для резонансной разрядной камеры в центре камеры и для запердельной разрядной камеры на поверхности ВЧ окна.

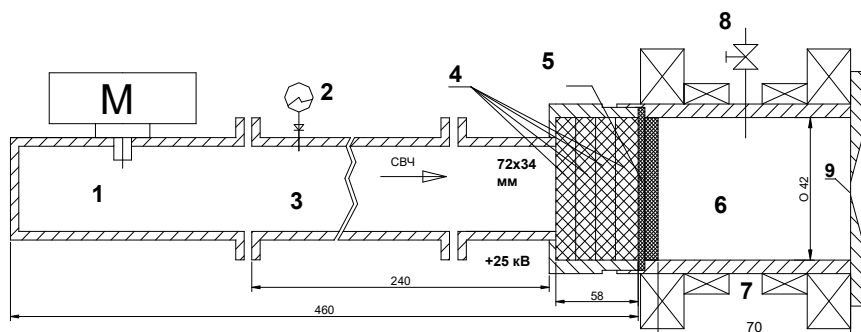


Рис. 2. Схема лабораторного источника ионов: 1 – секция с магнетроном; 2 – диодный детектор; 3 – измерительная секция; 4 – согласующий участок с керамикой  $\epsilon=8$ ; 5 – вакуумное высокочастотное окно с нитридом бора; 6 – разрядная камера  $\varnothing 42$  мм; 7 – постоянные магниты; 8 – ввод газа; 9- плазменное отверстие диаметром 4 мм.

Магнитная ловушка в данном источнике выполнена из постоянных магнитов  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  марки N35 кольцеобразной формы с продольным намагничиванием, конструкция предусматривает возможность установки соленоидальных магнитов вместо постоянных.

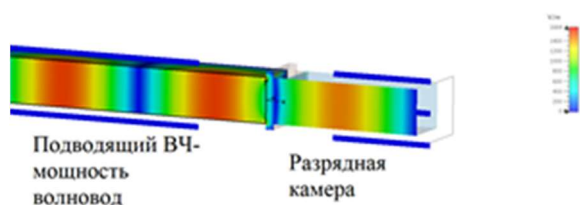


Рис. 3. Распределение электрического поля источника ионов с резонансной разрядной камерой.

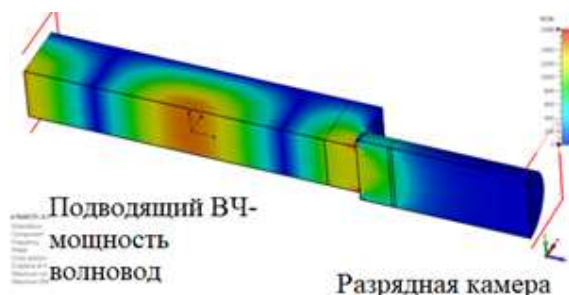


Рис. 4. Распределение электрического поля источника ионов я с разрядной камерой на основе запердельного волновода.

### 3. Исследование характеристик источников

Для каждого из рассмотренных выше ионных источников были измерены масс-зарядовые спектры времяпролетным методом [7] на универсальном испытательном стенде в НИЦ «Курчатовский институт» [8]. Масс-зарядовые спектры пучка ионов гелия для источников с резонансной и запердельной разрядной камерой соответственно представлены (см. Рис. 5, Рис. 6).

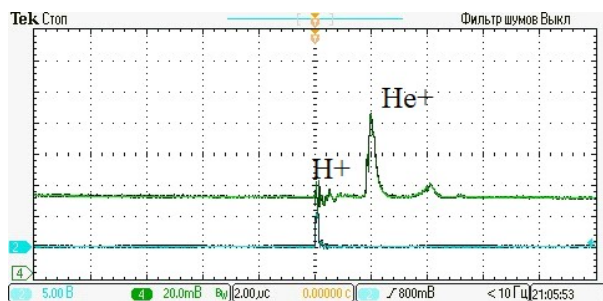


Рис. 5. Масс-зарядовый спектр пучка источника ионов гелия с резонансной разрядной камерой (зеленый сигнал).

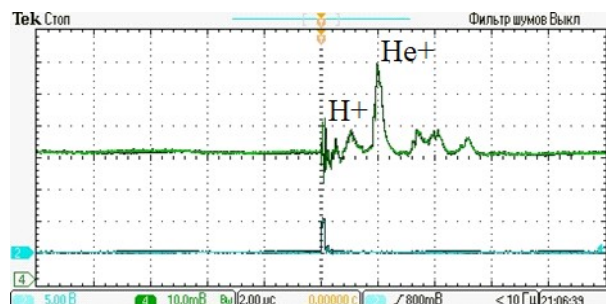


Рис. 6. Масс-зарядовый спектр пучка источника ионов гелия с разрядной камерой на основе запердельного волновода (зеленый сигнал).

В резонансной разрядной камере поджиг происходит в центре камеры, т.е. в среде рабочего газа, а в запердельной разрядной камере по поверхности керамики ВЧ окна. Соответственно во втором случае, масс-зарядовый спектр содержит больше ионов «грязи».

Измерения масс-зарядового состава пучка гелия показали наличие ионов гелия до (50-70)%, и ионов протия в пучке водорода до 90%.

Оба источника обладают схожими характеристиками (см. Таблица 1) по вырабатываемому току ионов гелия. Отказ от общепринятой схемы ВЧ питания источников (отсутствие циркулятора, штыревого фазовращателя, ступенчатого перехода, направленного ответвителя) позволяет обеспечить их компактность и возможность установки на высоковольтных платформах.

Таблица 1. Характеристики ионных источников.

	Источник с резонансной разрядной камерой	Источник на основе запердельного волновода
Величина магнитного поля на оси разрядной камеры, Гс	600–1000	1200–1800
Зеркальное отношение	1.33–1.2	1.3
Диапазон давлений, $\times 10^{-3}$ торр	1.4–9	1.4–9
Полный ток пучка, мА	3	5

#### 4. Вывод

Созданы и исследованы два источника легких ионов. Их отличительной особенностью являются малые габариты, простота эксплуатации и универсальность использования. С источников получен стабильный пучок ионов гелия. Помимо различных применений источники могут быть использованы для разрабатываемой многопучковой установки на канале легких ионов в НИЦ «Курчатовский институт». В настоящее время ведется разработка системы экстракции и формирования пучка этих ионных источников.

#### 5. Литературные источники

- [1] P.A. Fedin, K.E. Pryanishnikov, A.V. Ziyatdinova, et al., Simulation Experiments at the Heavy Ion Accelerator HIPr, *Phys. Atom. Nuclei*, vol. **85**(Suppl 2), S50, 2022, doi: 10.1134/S1063778822140071
- [2] P.A. Fedin., A.V. Ziyatdinova, K.E. Pryanishnikov, R.P. Kuibeda, T.V. Kulevoy, A.A. Nikitin, S.V. Rogozhkin, *J. Phys.: Conf., Ser.*, vol. **1686**, 012073, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1686/1/012073
- [3] S. Marghitu, The Duoplasmatron Formation of He<sup>++</sup> Ions, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. **23**(2), 1093, 1976, doi: 10.1109/TNS.1976.4328411
- [4] N. Savard, Development and Characterization of a Penning Ion Source Using Helium, *Electronic Theses and Dissertations (ETDs) 2008+*. T: University of British Columbia, 2022, doi: 10.14288/1.0412647
- [5] L. Pentecoste, A.-L. Thomann, A. Melhem, A. Caillard, S. Cuynet, T. Lecas, P. Brault, P. Desgardin, M.-F. Barthe, Low flux and low energy helium ion implantation into tungsten using a dedicated plasma source, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. **383**, 38, 2016, doi:10.1016/j.nimb.2016.06.011
- [6] D. Donovan, et al., Characterization of a compact ECR plasma source and its applications to studies of helium ion damage to tungsten, *Physica Scripta*, vol. **167**, 014040, 2016, doi: 10.1088/0031-8949/T167/1/014040
- [7] B.A. Mamyrin, Time-of-flight mass spectrometry (concepts, achievements, and prospects), *International Journal of Mass Spectrometry*, vol. **206**(3), 251, 2001, doi: 10.1016/S1387-3806(00)00392-4
- [8] D. Liakin, D.N. Seleznev, A.Y. Orlov, R.P. Kuibeda, G.N. Kropachev, T.V. Kulevoy and P. Yakushin, Portable emittance measurement device, *Review of Scientific Instruments*, vol. **81**, 02B719, 2010; doi: 10.1063/1.3267293