

Научная статья

УДК 537.563.2

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-48-56

Концепция ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц с перестраиваемым магнитным полем*

Максим Сергеевич Дмитриев¹, Максим Валентинович Дьяконов²
Марина Ивановна Жигайлова³, Олег Александрович Иванов⁴
Артем Сергеевич Краснов⁵, Сергей Алексеевич Туманов⁶

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

¹MSDmitriyev@mephi.ru

²MVDyakonov@mephi.ru

³MIZhigailova@mephi.ru

⁴OAIvanov@mephi.ru

⁵ASKrasnov@mephi.ru

⁶SATumanov@mephi.ru

Аннотация

Произведена разработка ЭЦР ионного источника на частоту 2,45 ГГц, предназначенного для получения протонов и двухзарядных ионов гелия. Проиллюстрирован вид конструкции ионного источника и его основных узлов. Представлена конфигурация магнитной системы, способной работать как в ЭЦР-, так и в СВЧ-режиме. Разработана система экстракции и формирования пучка ионов с возможностью продольного перемещения системы электродов относительно плазменного электрода. Приведена конфигурация волноводного тракта ионного источника с рабочей частотой 2,45 ГГц, обеспечивающего стабильную подачу мощности в рабочую камеру, а также выполнены расчет и оптимизация его элементов.

Ключевые слова

ионный источник, электронно-циклотронный резонанс, магнитная система, система экстракции, плазменная камера, волноводный тракт

Для цитирования

Дмитриев М. С., Дьяконов М. В., Жигайлова М. И., Иванов О. А., Краснов А. С., Туманов С. А. Концепция ЭЦР источника с рабочей частотой 2,45 ГГц с перестраиваемым магнитным полем // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 48–56. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-48-56

*Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Overall Concept Design of 2.45 GHz ECR Ion Source
with Tunable Magnetic Field

Maksim S. Dmitriev¹, Maksim V. Dyakonov², Marina I. Zhigaylova³
Oleg A. Ivanov⁴, Artem S. Krasnov⁵, Sergey A. Tumanov⁶

National Research Nuclear University MEPhI
(Moscow Engineering Physics Institute)
Moscow, Russian Federation

¹MSDmitriyev@mephi.ru
²MVDyakonov@mephi.ru
³MIZhigailova@mephi.ru
⁴OAIvanov@mephi.ru
⁵ASKrasnov@mephi.ru
⁶SATumanov@mephi.ru

Abstract
The design of the ECR ion source was made for an operating frequency of 2.45 GHz. The ion source is considered to be used for producing protons and double charged helium ions. The source construction as well as the separate components design are presented in the study. The operating modes include both ECR and microwave operating regimes. The extraction system with the beamforming was developed. The beam adjustment is implemented by the longitudinal shifting of the electrodes against the plasma electrode position. The performance of the 2.45 GHz waveguide line to provide the stable power injection into the plasma chamber is considered. The numerical simulation of the waveguide line components was made and optimised.

Keywords
ion source, electron-cyclotron resonance, magnetic system, extraction system, plasma chamber, waveguide line

For citation
Dmitriev M. S., Dyakonov M. V., Zhigaylova M. I., Ivanov O. A., Krasnov A. S., Tumanov S. A. Overall concept design of 2.45 GHz ECR ion source with tunable magnetic field. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 48–56 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-48-56

Введение

В настоящее время НИЯУ МИФИ ведется разработка плазменного ЭЦР ионного источника, предназначенного для получения протонов и ионов двухзарядного гелия. Сделана попытка совместить преимущества микроволнового и ЭЦР источника в одном устройстве, способном работать в обоих режимах работы путем глубокой перестройки распределения магнитного поля.

Таблица 1
Основные характеристики 2,45 ГГц ЭЦР ионного источника
Table 1
The main properties of the 2.45GHz ECRIS

Тип ионов	p ⁺	He ²⁺
Энергия ионов, кэВ/нуклон	40	
Интенсивность, частиц в импульсе	до 2,5·10 ¹¹	до 2·10 ⁹
Длительность импульса, мс	20	
Давление в плазменной камере, Па	до 3·10 ⁻⁴	
СВЧ мощность, Вт	≤ 1000	
Рабочая частота, ГГц	2,45	

Разрабатываемый плазменный источник ионов предназначен для экспериментального обоснования возможности получения интенсивных пучков протонов и слаботочных пучков многозарядных ионов, в том числе гелия, в источнике с рабочей частотой 2,45 ГГц. Для реализации этих задач в одном источнике были применены следующие технические решения. Разработана магнитная система с глубокой перестройкой магнитного поля, позволяющая реализовать распределения поля как в ЭЦР-, так и в СВЧ-режиме, система СВЧ питания источника, длиннофокусная система экстракции ионов с электростатической линзой и возможностью подстройки параметров системы. В табл. 1 приведены основные характеристики плазменного ионного источника.

1. Разработка магнитной системы

Для генерации сильноточных пучков протонов или однозарядных ионов с током до 100 мА и небольшим эмиттансом, как правило, используются источники, работающие в СВЧ-режиме. Для получения ионов большей зарядности необходимо использовать источники на основе электронно-циклотронного резонанса. Магнитная система микроволновых источников и источников, работающих на электронно-циклотронном резонансе, имеют различные конфигурации. Последняя имеет дополнительные гексапольные или октапольные магниты, обеспечивающие формирование магнитной ловушки с ЭЦР-областью и конфигурацией «минимум В», что поддерживает возможность более глубокой обдирки ионов в процессе ступенчатой ионизации. Для ЭЦР источника с частотой 2,45 ГГц рассматривается возможность получения ионов с зарядностью, равной двум, с целью генерации двухзарядных ионов гелия. В продольном направлении плазма ограничена магнитными зеркалами на кольцевых постоянных магнитах или соленоидах, расположенных в областях окна ввода мощности и плазменного электрода, а в поперечном удерживается октапольными и гексапольными магнитами.

В рамках разработки ионного источника на частоте 2,45 ГГц, была построена математическая модель магнитной системы и произведено ее численное моделирование методом конечных элементов, после чего была осуществлена оптимизация распределения магнитного поля [1; 2].

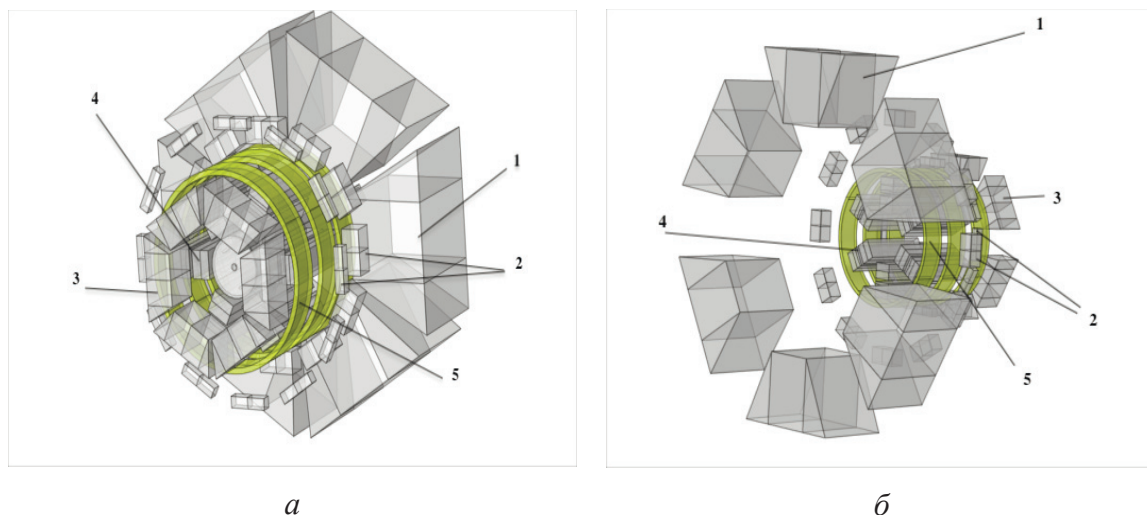


Рис. 1. Конфигурация магнитной системы, работающей в различных режимах:

a – электронно-циклотронного резонанса; *б* – микроволнового разряда.

1 – инжекционный кольцевой магнит; 2 – средний кольцевой магнит; 3 – кольцевой магнит области экстракции;
4 – гексаполь; 5 – соленоиды

Fig. 1. Magnetic system configuration operating in the different modes:

a – electron cyclotron resonance; *b* – microwave discharge

1 – injection ring magnet; 2 – medium ring magnet; 3 – ring magnet of the extraction area; 4 – hexapole; 5 – solenoids

Итоговая магнитная система состоит из трех комплектов магнитов. Гексаполюсный магнит состоит из двух сборок и обеспечивает регулировку радиального поля. Осевое поле создается двумя сборками трапецеидальных магнитов. Магниты сборок сдвинуты к оси камеры в ЭЦР-режиме работы источника (рис. 1, а) и отодвинуты от оси в СВЧ-режиме работы (рис. 1, б). В системе имеется несколько соленоидов, обеспечивающих дополнительную регулировку значений поля в области инжекции и экстракции. На рис. 2 приведено распределение магнитного поля вдоль продольной координаты для представленной системы магнитов в ЭЦР- и СВЧ-режимах работы [3]. При этом на рис. 2, а красными линиями обозначены границы плазменной камеры.

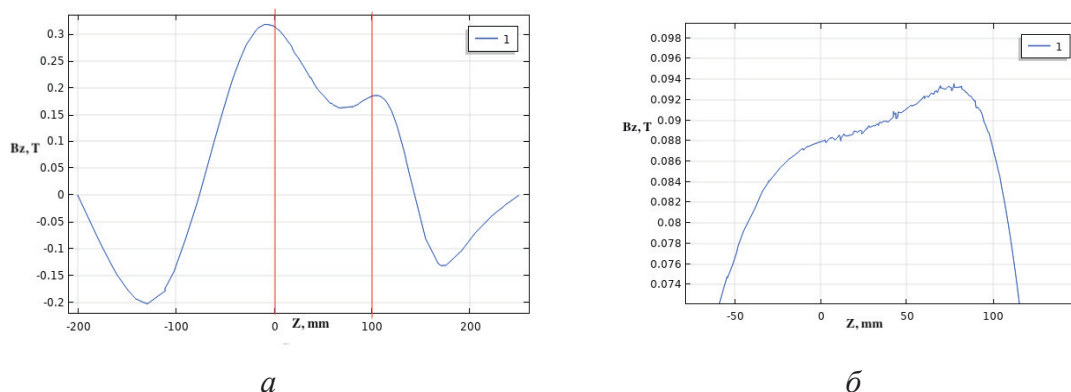


Рис. 2. Распределение магнитного поля вдоль продольной оси камеры в различных режимах:

а – электронно-циклотронного резонанса; б – микроволнового разряда

Fig. 2. Magnetic field distribution along the chamber longitudinal axis in the different modes:

а – electron cyclotron resonance; б – microwave discharge

Исходя из полученных результатов, рассчитанная конструкция магнитной системы может использоваться как в ЭЦР-режиме для получения двухзарядных ионов гелия, так и в СВЧ-режиме для получения протонов и однозарядных ионов гелия.

2. Оптимизация системы экстракции

Система экстракции построена на основе пирсовской системы электродов и электростатической линзы. Развитая магнитная система плазменного СВЧ-источника ионов накладывает жесткие ограничения на конструкцию извлекающей системы. Для получения требуемых параметров пучка разработана конструкция с ускоряющей несимметричной электростатической линзой (рис. 3).

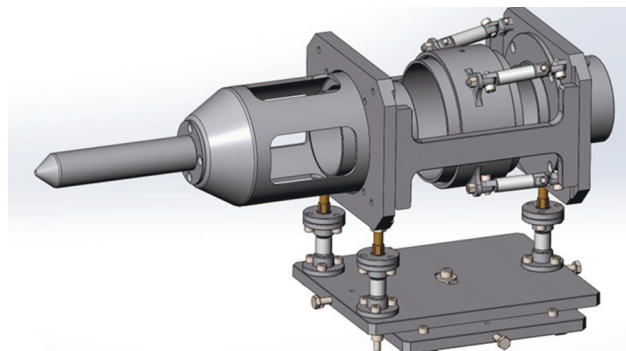


Рис. 3. Несимметричная электростатическая линза в сборе с извлекающим электродом

Fig. 3. An asymmetric electrostatic lens assembly with an extraction electrode

Для приведенной конфигурации системы экстракции эмиттанс пучка протонов на выходе из экстрактора составил $0,0036 \text{ мм} \cdot \text{рад}$, а диаметр пучка 7 мм на расстоянии 1 м от наконечника извлекающего электрода. На рис. 4 представлено поведение пучка протонов, извлекаемого экстрактором.

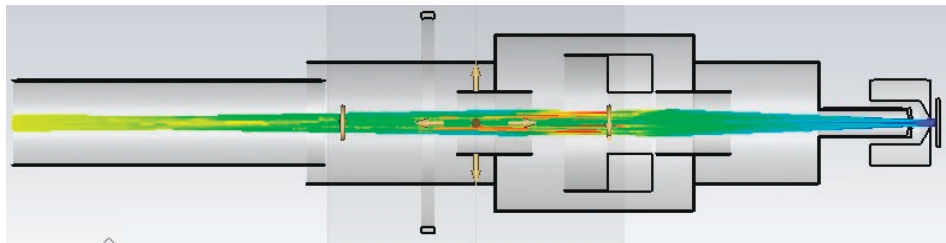


Рис. 4. Моделирование пучка протонов в экстракторе
Fig. 4. Simulation of a proton beam in an extractor

В системе существует возможность регулировки позиционирования извлекающего электрода относительно магнитной системы и плазменного электрода, а также возможность замены всех электродов.

3. Разработка системы СВЧ-питания

Одним из важнейших узлов плазменного ЭЦР источника ионов является система подачи СВЧ-мощности в плазменную камеру. На рис. 5 представлена схема системы подачи СВЧ-питания ЭЦР ионного источника [4]. Она представляет собой волноводный тракт с приведенным набором элементов. В качестве источника питания данной системы используется магнетрон. Представленная схема обеспечивает непрерывную подачу СВЧ-мощности в рабочую камеру, минимизацию отражения от плазменной нагрузки, а также возможность измерения уровня падающей и отраженной волны.

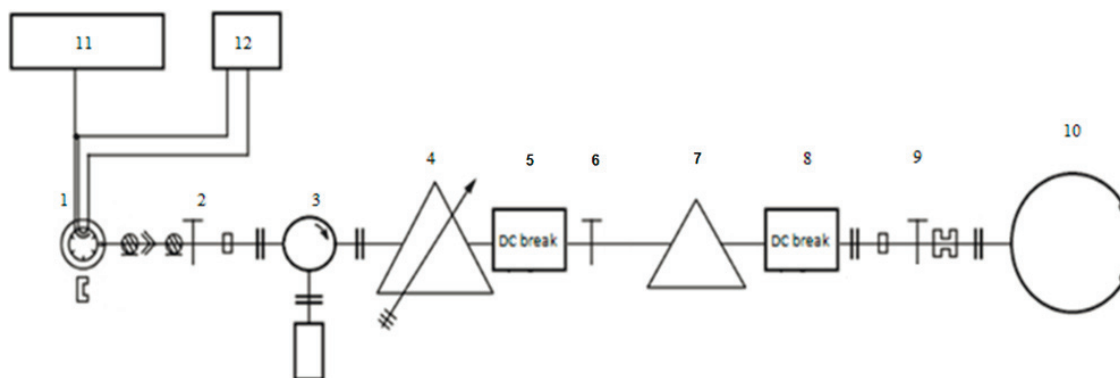


Рис. 5. Схема системы СВЧ-питания ЭЦР ионного источника:

1 – магнетрон; 2 – коаксиально-волноводный переход; 3 – циркулятор волноводный; 4 – трехшлейфовый штыревой согласователь с ручной регулировкой; 5 – высоковольтный DC-break; 6 – волноводный переход с WR 340 на WR 284; 7 – баночное окно ввода мощности; 8 – низковольтный DC-break; 9 – волноводный переход с прямоугольного волновода WR 284 на H-образный 43×12 ; 10 – рабочая камера, 11 – источник анодного питания магнетрона; 12 – трансформатор накала магнетрона

Fig. 5. The scheme of the ECRIS microwave power supply system:

1 – magnetron; 2 – coaxial waveguide adapter; 3 – waveguide circulator; 4 – triple-stub tuner with manual adjustment; 5 – high-voltage DC-break; 6 – waveguide transition from WR 340 to WR 284; 7 – power input window; 8 – low-voltage DC-break; 9 – waveguide transition from a rectangular waveguide WR 284 to an H-shaped 43×12 ; 10 – working chamber; 11 – magnetron anode power supply; 12 – magnetron filament transformer

Для обеспечения работы магнетрона в непрерывном режиме, а также стабильности частоты самого магнетрона была выполнена разработка блока питания магнетрона с регулируемым постоянным рабочим напряжением до 5 кВ.

Важно отметить, что плазма в источнике представляет собой нагрузку с переменным волновым сопротивлением, зависящим как от времени (при поджиге плазмы), так и от режима работы источника, что негативно скажется как на КПД передачи мощности в рабочую камеру, так и на стабильности выходной мощности и частоты колебаний магнетрона. Для решения данной проблемы в тракте используется трехшлейфовый штыревой согласователь, позволяющий согласовать волноводный тракт с плазменной нагрузкой с СВЧ-генератором [5–7].

Рабочая камера плазменного ЭЦР ионного источника расположена на высоковольтной платформе, потенциал которой составляет 80 кВ. При этом сам магнетрон и измерительную часть тракта необходимо расположить на заземленной части источника. Для разделения высоковольтной и низковольтной частей был разработан DC-break, позволяющий обеспечить не только разрыв по постоянному току, но также отсутствие излучения мощности в окружающее пространство и максимальное прохождение электромагнитной волны через DC-break. Вид разработанной конструкции DC-break приведен на рис. 6, а зависимость коэффициента отражения от частоты – на рис. 7.



Рис. 6. Вид DC-break
Fig. 6. DC-break view

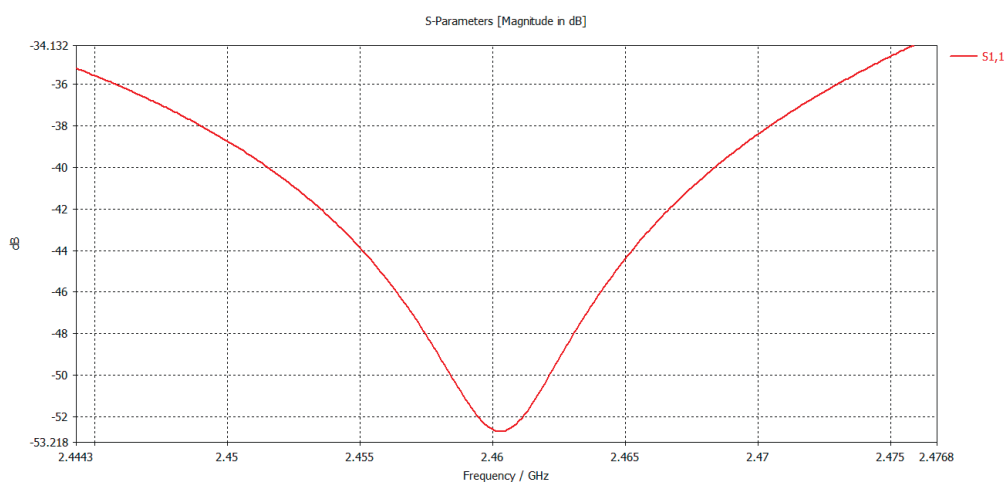


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от частоты
Fig. 7. Dependence of the reflection coefficient on the frequency

Разработанная система СВЧ-питания плазменного ионного источника обеспечивает эффективную передачу мощности в плазменную камеру, а также стабильную работу магнетрона.

4. Конструкция плазменного ионного источника

Для получения требуемых параметров магнитного поля в плазменной камере необходимо обеспечить точное, синхронное перемещение магнитов. Разработана система перемещения магнитов на основе шаговых двигателей с удаленным управлением с помощью компьютера (рис. 8). При этом обеспечивается точность установки, необходимая при перестроении магнитного поля плазменного источника ионов.

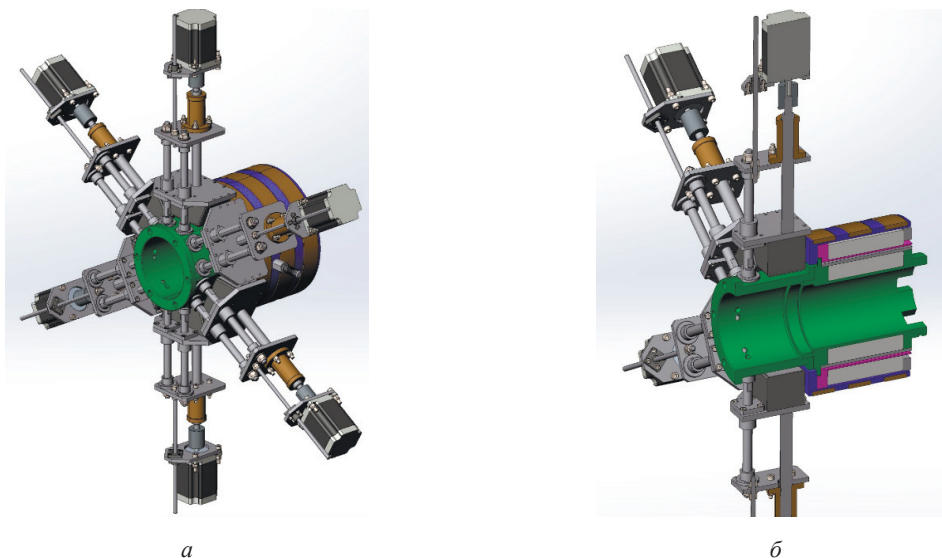


Рис. 8. Система перемещения магнитов:

a – общий вид системы перемещения магнитов; *б* – система перемещения магнитов в разрезе

Fig. 8. The magnet shifting system:

a – the general view of the magnet shifting system; *б* – the section view of magnet shifting system

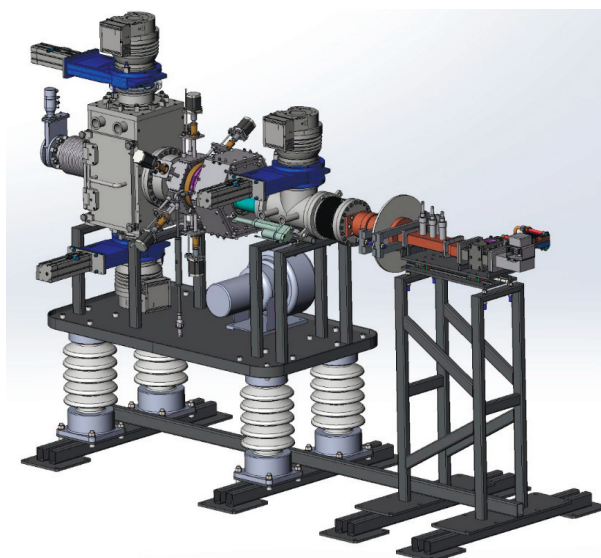


Рис. 9. Общий вид конструкции ЭЦР ионного источника

Fig. 9. General view of the ECRIS design

Разработана конструкция ЭЦР источника ионов, включающая высоковольтную платформу и другие инженерные системы (рис. 9).

Заключение

Разработан плазменный источник ионов, позволяющий получать протоны и однозарядные ионы при работе в СВЧ-режиме и имеющий возможность получения многозарядных ионов при работе в ЭЦР-режиме. Переключение режимов происходит за счет изменяемой конфигурации магнитной системы. Разработана система экстракции и формирования пучка ионов с возможностью продольного перемещения системы электродов относительно плазменного электрода. Приведена конфигурация волноводного тракта ионного источника с рабочей частотой 2,45 ГГц, с разработанными элементами, обеспечивающими стабильную передачу СВЧ-мощности в рабочую камеру.

Список литературы

1. **Dmitriyev M. S. et al.** Magnetic System with Variable Characteristics for a 2.45 GHz ECRIS // *Proc. of RuPAC'21*, 2021. P. 310–312. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB38.
2. **Artamonov K. G. et al.** Magnetic System with Adjustable Characteristics for Electron Cyclotron Resonance Ion Source with Operating Frequency of 2.45 GHz // *Physics of Atomic Nuclei*. 2021. Vol. 84. P. 2010–2013. DOI: 10.1134/S1063778821100057.
3. **Muramatsu M. et al.** Development of an ECR ion source for carbon therapy // *Rev. Sci. Instrum.* 2002. Vol. 73, № 2. P. 573.
4. **Dmitriyev M. S., D'yakonov M. V., Tumanov S. A.** Waveguide Development for a 2.46 GHz Electron Cyclotron Resonance Ion Source // *Physics of Atomic Nuclei*. 2022. T. 85, № 11. C. 1899–1901.
5. **Kuang Y., Zhou L., Li S., Fan X., and Cheng Q. S.** In Proceedings of the 11th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology ICMMT'2019, Guangzhou, China, May 2019. <https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992397>
6. **Grecu L.** Using short stubs for matching the impedance of a load to the impedance of a transmission line-analytical solution and computer code // *International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems Brasov*. 2007. Vol. 8, no. 3 (21a). P. 492. URL: https://www.recentonline.ro/021/Grecu_L_02b-R21.pdf
7. **Bilik V. and Bezek J.** High power limits of waveguide stub tuners // *J. Microw. Power*. 2010. Vol. 44. P. 178–186.

References

1. **Dmitriyev M. S. et al.** Magnetic System with Variable Characteristics for a 2.45 GHz ECRIS. *Proc. of RuPAC'21*, 2021, pp. 310-312. DOI: 10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB38.
2. **Artamonov K. G. et al.** Magnetic System with Adjustable Characteristics for Electron Cyclotron Resonance Ion Source with Operating Frequency of 2.45 GHz. *Physics of Atomic Nuclei*, 2021, vol. 84, pp. 2010–2013. DOI: 10.1134/S1063778821100057
3. **Muramatsu M. et al.** Development of an ECR ion source for carbon therapy. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, vol. 73, no. 2, p. 573.
4. **Dmitriyev M. S., D'yakonov M. V., Tumanov S. A.** Waveguide Development for a 2.46 GHz Electron Cyclotron Resonance Ion Source. *Physics of Atomic Nuclei.*, 2022, vol. 85, no. 11, pp. 1899–1901.
5. **Kuang Y., Zhou L. Li S. Fan X. and Cheng Q. S.** In Proceedings of the 11th International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology ICMMT'2019, Guangzhou, China, May 2019. <https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992397>

6. **Grecu L.** Using short stubs for matching the impedance of a load to the impedance of a transmission line-analytical solution and computer code. *International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems Brasov*, 2007, vol. 8 no. 3 (21a), p. 492. URL: https://www.recentonline.ro/021/Grecu_L_02b-R21.pdf
7. **Bilik V. and Bezek J.** High power limits of waveguide stub tuners. *J. Microw. Power*, 2010, vol. 44, pp. 178–186.

Сведения об авторах

Дмитриев Максим Сергеевич, кандидат технических наук

Дьяконов Максим Валентинович, ведущий инженер

Жигайлова Марина Ивановна, аспирант, инженер

Иванов Олег Александрович, аспирант, инженер

Краснов Артем Сергеевич, аспирант, инженер

Туманов Сергей Алексеевич, аспирант, инженер

Information about the Authors

Maksim S. Dmitriev, Candidate of Technical Sciences

Maksim V. Dyakonov, Leading Engineer

Marina I. Zhigaylova, Postgraduate Student, Engineer

Oleg A. Ivanov, Postgraduate Student, Engineer

Artem S. Krasnov, Postgraduate Student, Engineer

Sergey A. Tumanov, Postgraduate Student, Engineer

*Статья поступила в редакцию 19.09.2023; одобрена после рецензирования 21.04.2024;
принята к публикации 21.06.2024*

*The article was submitted 19.09.2023; approved after reviewing 21.04.2024;
accepted for publication 21.06.2024*