

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ  
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 537.563.2

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ  
ДЛЯ ИОННОГО ИСТОЧНИКА  
НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ  
С РАБОЧЕЙ ЧАСТОТОЙ 2.45 ГГц

© 2022 г. К. Г. Артамонов<sup>а</sup>, М. С. Дмитриев<sup>а, \*</sup>, М. И. Жигайлова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

\*E-mail: msdmiriyev@mephi.ru

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 09.08.2021 г.

В работе представлено описание магнитной системы разрабатываемого ионного источника на электронно-циклотронном резонансе с рабочей частотой 2.45 ГГц для получения протонов и двухзарядных ионов гелия. Приведены результаты численного моделирования магнитной системы ЭЦР источника на постоянных магнитах. Представлена конфигурация с возможностью перемещения кольцевых магнитов области инжекции и экстракции для настройки распределения магнитного поля, в частности максимальных значений  $B_{inj}$  и  $B_{ext}$  на оси плазменной камеры, а также возможностью перемещения брусков секступольного магнита в радиальном направлении для настройки магнитного поля  $B_{rad}$  на границе камеры. Для получения профиля магнитного поля, соответствующего режиму микроволнового источника, рассмотрена конструкция магнитной системы с использованием дополнительных соленоидов, обеспечивающих подстройку значений  $B_{inj}$  и  $B_{ext}$  в требуемых пределах, а также регулировку минимума магнитного поля  $B_{min}$  на оси камеры при неизменном положении всех кольцевых магнитов.

*Ключевые слова:* ионный источник, электронно-циклотронный резонанс, магнитная система, плазменная камера, соленоид

DOI: 10.56304/S2079562922010043

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ускорители высоких энергий широко используются как для фундаментальных, так и для прикладных задач. Источники заряженных частиц являются одной из важнейших составляющих ускорительного комплекса и представляют широкий интерес для исследований. Ионные источники, основанные на микроволновом разряде, пользуются широким интересом и являются предметом исследований на протяжении последних десятилетий.

В качестве основы разработки магнитной системы источника для получения протонов и двухзарядных ионов гелия, а также легких однозарядных ионов с рабочей частотой 2.45 ГГц были рассмотрены два типа источников. В первом, источнике на электронно-циклотронном резонансе (ЭЦР), взаимодействие СВЧ излучения с плазмой происхо-

дит на электронно-циклотронной частоте при низком давлении газа в то время, как в источнике на микроволновом разряде взаимодействие не зависит от резонанса с магнитным полем. В соответствии с условиями генерации плазмы параметры ионных пучков, полученных от источников, создающих плазму этих двух типов, также существенно различаются. В ЭЦР источниках ионов зарядовые состояния полученных ионов могут быть чрезвычайно высоки, тогда как плотность ионного тока, как правило, мала. В источниках с СВЧ накачкой ток ионного пучка может быть высок, но ионы в основном однозарядные.

Целью данной работы является разработка магнитной системы с регулируемыми характеристиками для нового источника ионов с рабочей частотой 2.45 ГГц, способного работать как в ЭЦР режиме для получения ионов двухзарядного гелия, так и в режиме СВЧ-источника.

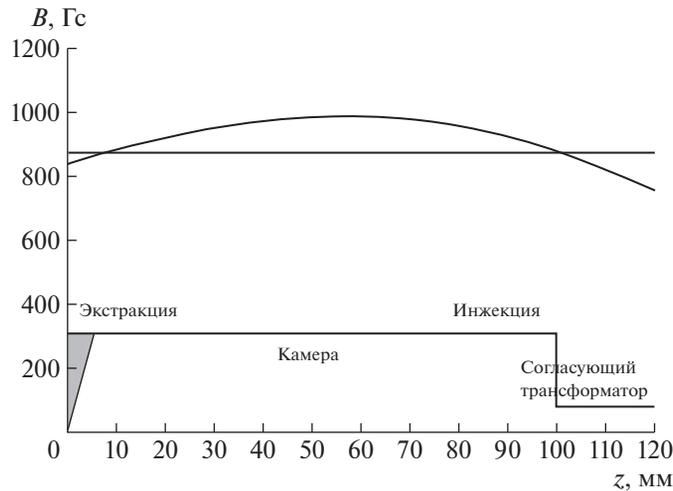


Рис. 1. Оптимизированное магнитное поле источника TRIPS. Прямая линия на графике соответствует резонансной величине магнитного поля для частоты 2.45 ГГц.

### 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ И ИСТОЧНИКОВ НА МИКРОВОЛНОВОМ РАЗРЯДЕ

Для получения пучков протонов или однозарядных ионов с током до 100 мкА и малым эмиттансом чаще всего используются источники на микроволновом разряде как в импульсном, так и в непрерывном режимах работы. Они отличаются от источников на циклотронном резонансе выбором частоты, выше циклотронной, и отсутствием секступольных или октупольных магнитов, задерживающих ионы в области ЭЦР для дальнейшего увеличения их зарядности. Интенсивные магнитные поля, создаваемые с помощью соленоидов или постоянных магнитов, используются для увеличения плотности ионов и получения оптимального тока. Профиль магнитного поля в плазменной камере важен не только для обеспечения генерации плазмы, но и для повышения надежности и стабильности работы источника. На рис. 1 представлен оптимизированный профиль магнитного поля двух соленоидов источника, разработанного в INFN-LNS в Италии [1].

ЭЦР источники ионов сохраняют основные преимущества микроволновых (надежность, стабильность, компактность и т.д.). В случае необходимости получения многозарядных ионов, в данном случае двухзарядных ионов гелия, необходимо применять резонансные источники со ступенчатой ионизацией. Ускоренные в переменном электрическом поле электроны постепенно выбивают электроны с внешней оболочки ионизируемых атомов. При этом относительно медленные ионы оказы-

ваются захваченными магнитным полем и продолжают терять электроны в результате ионизации вновь ускоренными электронами [2]. Для получения ионов двухзарядного гелия конфигурация магнитного поля должна соответствовать условиям лучшего удержания плазмы и увеличения ее плотности. С этой целью аксиальное магнитное поле делают двугорбым. При этом узел ввода мощности (окно) и плазменный электрод расположены в зоне ЭЦР на обоих концах источника. В радиальном направлении плазму ограничивают установленными вокруг плазменной камеры октупольными или гексапольными магнитами. Характерное осевое распределение магнитного поля ЭЦР-источника представлено на рис. 2 [3].

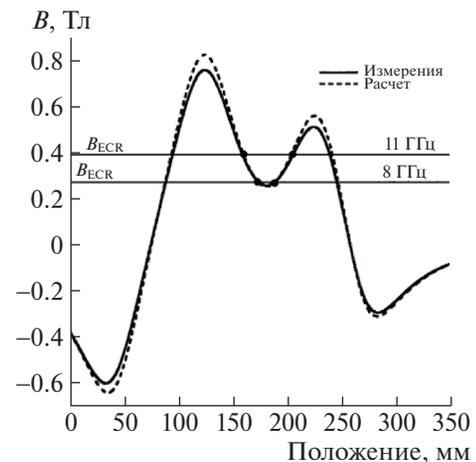
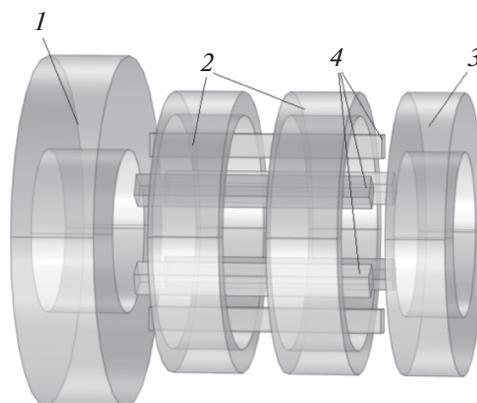
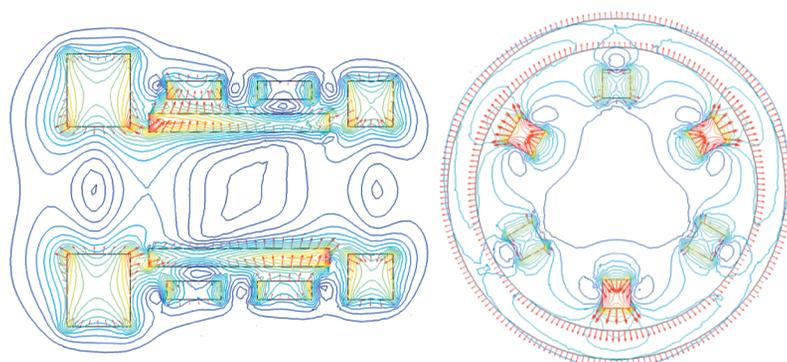


Рис. 2. Пример оптимального распределение магнитного поля на оси плазменной камеры ЭЦР-источника.



**Рис. 3.** Начальная конфигурация магнитной системы ЭЦР-источника с рабочей частотой 2.45 ГГц: 1 – кольцевой магнит области инжекции, 2 – центральные кольцевые магниты, 3 – кольцевой магнит области экстракции, 4 – секступольный магнит.



**Рис. 4.** Направления магнитного поля у поверхностей магнитов и эквипотенциальные линии.

## 2. КОНФИГУРАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЦР ИСТОЧНИКА НА 2.45 ГГц

Для разработки ионного источника с рабочей частотой 2.45 ГГц с возможностью регулирования характеристик магнитного поля построена математическая модель магнитной системы. Численное моделирование магнитного поля производилось с помощью метода конечных элементов. Схема начального варианта магнитной системы источника представлена на рис. 3.

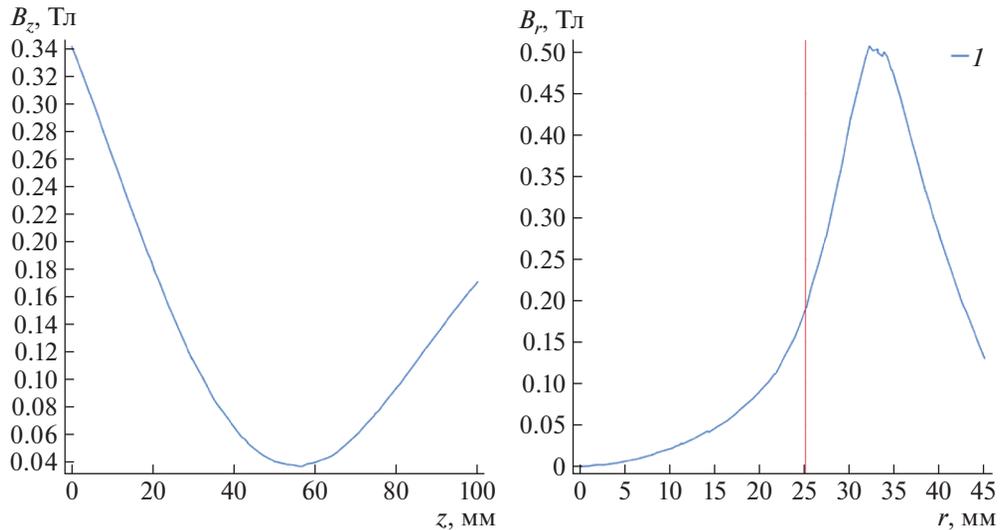
В качестве материала постоянных магнитов системы был выбран материал NdFeB марки N45. Длина брусков секступольного магнита была выбрана таким образом, чтобы соответствовать длине плазменной камеры – 100 мм. Диаметр плазменной камеры – 50 мм. Полученная в результате моделирования картина силовых линий магнитного поля показана на рис. 4. Оптимальные и полученные в результате моделирования значения индукции магнитного поля приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Оптимальные и расчетные значения индукции магнитного поля для источника на 2.45 ГГц

	$B_{inj}$ , Тл	$B_{min}$ , Тл	$B_{rad}$ , Тл	$B_{ext}$ , Тл
Оптимальные	0.350	$0.058 <  B _{min} < 0.087$	0.193	0.175
Расчетные	0.296	0.0165	0.146	0.199

**Таблица 2.** Оптимизированные характеристики магнитного поля источника на 2.45 ГГц

	$B_{inj}$ , Тл	$B_{min}$ , Тл	$B_{rad}$ , Тл	$B_{ext}$ , Тл
Оптимальные	0.350	$0.058 <  B_{min}  < 0.087$	0.193	0.175
Расчетные	0.342	0.036	0.190	0.171



**Рис. 5.** Осевое и радиальное распределения магнитного поля оптимизированной магнитной системы.

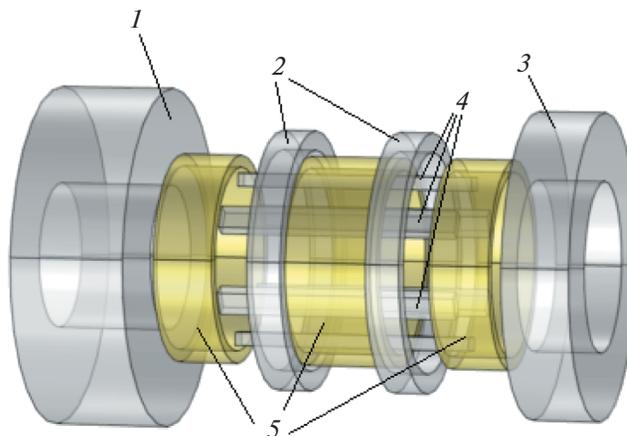
### 3. ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ЭЦР ИСТОЧНИКА

Первый этап оптимизации магнитной системы заключался в изменении положения магнитов относительно друг друга, а также изменении геометрических параметров магнитов для получения наиболее оптимального профиля магнитного поля. Результаты численного моделирования – распределения аксиальной компоненты индукции

магнитного поля вдоль оси системы  $B_z$  и радиальной компоненты  $B_r$  – представлены на рис. 5. Ключевые параметры оптимизированной магнитной системы представлены в табл. 2.

### 4. МИКРОВОЛНОВЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА

Была исследована возможность регулировки минимума осевого распределения магнитного поля



**Рис. 6.** Магнитная система ЭЦР источника с соленоидами: 1 – магнит области инжекции, 2 – средние магниты, 3 – магнит области экстракции, 4 – бруски гексапольного магнита, 5 – соленоиды.

**Таблица 3.** Оптимальные и расчетные значения индукции магнитного поля магнитной системы с соленоидами

	$B_{inj}$ , Тл	$B_{min}$ , Тл	$B_{rad}$ , Тл	$B_{ext}$ , Тл
Оптимальные	0.350	$0.058 <  B _{min} < 0.087$	0.193	0.175
Расчетные	0.353	0.068	0.190	0.177

**Таблица 4.** Минимальные токи соленоидов, необходимые для рассматриваемых режимов работы источника

Режим	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_3$ , А
Микроволновый источник	-36	8	-19
ЭЦР источник	13	2.2	-0.5

$B_{min}$  при неизменном положении всех кольцевых магнитов, а также возможность перестройки режима работы ЭЦР источника в микроволновый источник протонов и однозарядных ионов. Для обеспечения данного режима работы необходимо настроить магнитную систему таким образом, чтобы профиль осевого распределения магнитного поля соответствовал рис. 1. В качестве оптимизированной конфигурации была предложена система с тремя дополнительными соленоидами, модель которой изображена на рис. 6.

Моделирование магнитной системы осуществлялось для двух режимов работы источника: для генерации однозарядных и двухзарядных ионов. Результаты моделирования представлены как для режима генерации однозарядных ионов, так и для режима генерации многозарядных ионов. Оптимальные и расчетные ключевые параметры рассматриваемой модификации магнитной системы в режиме генерации двухзарядных ионов пред-

ставлены в табл. 3. Токи соленоидов, необходимые для режимов генерации однозарядных или двухзарядных ионов, приведены в табл. 4, где  $I_k$  – ток  $k$ -й катушки.

Согласно полученным результатам моделирования включение в конфигурацию магнитной системы дополнительных соленоидов позволяет обеспечить работу источника как в режиме генерации однозарядных ионов, так и в режиме генерации двухзарядных ионов, а также осуществлять подстройку распределения магнитного поля на оси плазменной камеры источника.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в данной работе магнитная система с регулируемыми характеристиками источника протонов, однозарядных, а также двухзарядных ионов гелия удовлетворяет требуемым условиям, обеспечивая работу источника как в ЭЦР режиме, так и в режиме источника с СВЧ-накачкой. Будет проводиться дальнейшая оптимизация параметров магнитной системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Габович М.Д.* // Физика и техника плазменных источников ионов. 1972. Москва: Атомиздат.
2. *G. Ciavola et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 1453.
3. *Muramatsu M. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73 (2). P. 573.

## Magnetic System with Adjustable Characteristics for Electron Cyclotron Resonance Ion Source with Operating Frequency of 2.45 GHz

K. G. Artamonov<sup>1</sup>, M. S. Dmitriyev<sup>1</sup>, \*, and M. I. Zhigailova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

\*e-mail: msdmitriyev@mephi.ru

Received July 19, 2021; revised August 9, 2021; accepted August 9, 2021

**Abstract**—This paper presents a description of the magnetic system of the developed electron cyclotron resonance (ECR) ion source with an operating frequency of 2.45 GHz for producing protons and doubly charged helium ions. The results of numerical simulations of the magnetic system of the ECR source built on perma-

nent magnets are presented. A configuration with the possibility of moving the ring magnets of the injection and extraction area to adjust the magnetic field distribution, in particular, the maximum values of  $B_{inj}$  and  $B_{ext}$  at the plasma chamber axis, and with the possibility of moving the bars of the sextupole magnet in the radial direction to adjust the magnetic field  $B_{rad}$  at the chamber boundary is presented. To obtain the magnetic field profile corresponding to the mode of the microwave source, the design of the magnetic system with the use of additional solenoids providing adjustment of  $B_{inj}$  and  $B_{ext}$  values within the required limits as well as adjustment of the minimum magnetic field  $B_{min}$  on the chamber axis at fixed position of all ring magnets is considered.

*Keywords:* ion source, electron cyclotron resonance, magnetic system, plasma chamber, solenoid