

УДК 621.3.038.612

Моделирование магнитной структуры компактного 14 ГГц**ЭЦР источника многозарядных ионов**

К.И. Берестов, Д.К. Пугачёв, Д.С. Подойников
 Научный руководитель: к.т.н. С.Л. Богомолов
 Объединенный институт ядерных исследований,
 Россия, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6, 141980
 E-mail: kib5@jinr.ru

Simulation of magnetic structure 14 GHz compact ECR Ion Source of multiply charged ions

K.I. Berestov, D.K. Pugachev, D.S. Podoinikov
 Scientific Supervisor: Ph.D., S.L. Bogomolov
 Joint Institute for Nuclear Research, Russia, Dubna, Joliot-Curie str., 6, 141980
 E-mail: kib5@jinr.ru

Abstract. Multiple charged ion beams are of special interest in the fields of atomic and nuclear physics, material science and other applications. Electron cyclotron resonance (ECR) ion source can produce high intensity ion beams of high charge state in cw or pulse mode. All permanent magnet ECR ion sources have many advantages over traditional ECR ion sources composed of several axial room temperature solenoids and one permanent hexapole magnet, which make them suitable for heavy ion facilities based on high voltage platforms and Van de Graaff Accelerators. The article presents the results of simulations of the magnetic structure of the compact 14 GHz ECR Ion source based on permanent magnets for the production of multiply charged ion beams. The magnetic system consists of 7 permanent magnet rings (NdFeB) and hexapole. For different plasma chamber diameter, the optimal configuration of the magnetic system has been determined to obtain the B_{inj} , B_{ext} and B_{min} values in the required range. The optimal position of UHF power input at which power reflection is minimal was determined.

Key words: ECR Ion source, plasma, magnetic fields, UHF.

Введение

Ионные источники на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) нашли широкое применение во многих лабораториях мира для получения пучков ускоренных ионов, используемых в фундаментальных и прикладных исследованиях в области ядерной физики, физике твердого тела и др.

Результаты исследований [1] показали, что магнитное поле, создаваемое суперпозицией аксиального и радиального полей для удержания плазмы в ЭЦР-источнике и эффективного образования многозарядных ионов, должно удовлетворять следующим соотношениям магнитной индукции (B_{rad} – радиальное магнитное поле, B_{inj} – магнитное поле в области инжекции, B_{ext} – магнитное поле в области экстракции, B_{min} – минимальное магнитное поле на оси источника, B_{ECR} – резонансное магнитное поле):

$$\begin{aligned} B_{rad} &= 2 \div 2.2 B_{ECR}; \\ B_{inj} &= 3 \div 4 B_{ECR}; \\ B_{ext} &\geq B_{rad}; \\ B_{min} &= 0.3 \div 0.45 B_{rad}. \end{aligned}$$

В университете IFUNAM (Мексика) на 5.5 МВ ускорителе Ван де Граафа планируется проведение исследований в области низкоэнергетической ядерной физики и изучения свойств материалов. Для выполнения этих задач необходимо разработать ЭЦР-источник ионов, способный получать пучки многозарядных ионов. В связи с тем, что ЭЦР-источник будет

расположен на высоковольтном термине ускорителя, габариты которого ограничены, то он должен быть компактным, и иметь низкое энергопотребление, так как доступная на термине мощность ограничена 1 кВт. Источник будет находиться в объеме, находящимся под высоким давлением и напряжением, что делает трудным работы по его техническому обслуживанию, поэтому он должен иметь длительный, непрерывный ресурс работы (не менее 2000 ч.).

Целью работы является определение конфигурации магнитной системы для получения требуемого распределения магнитного поля, и определение оптимального положения ввода СВЧ с целью максимального поглощения мощности в резонансной зоне ЭЦР источника ионов.

Экспериментальная часть

Рабочая частота источника выбрана 14 ГГц, что позволяет выполнить магнитную систему полностью из постоянных магнитов. При выборе материала магнитов нужно учитывать критическое поле размагничивания, магнитную индукцию насыщения, коэрцитивную силу и температуру размагничивания. Для расчета выбран материал NdFeB (N48SH) [2]. Схематическое изображение магнитной системы показано на рисунке 1, а распределение магнитного поля на оси системы показано на рисунке 2.

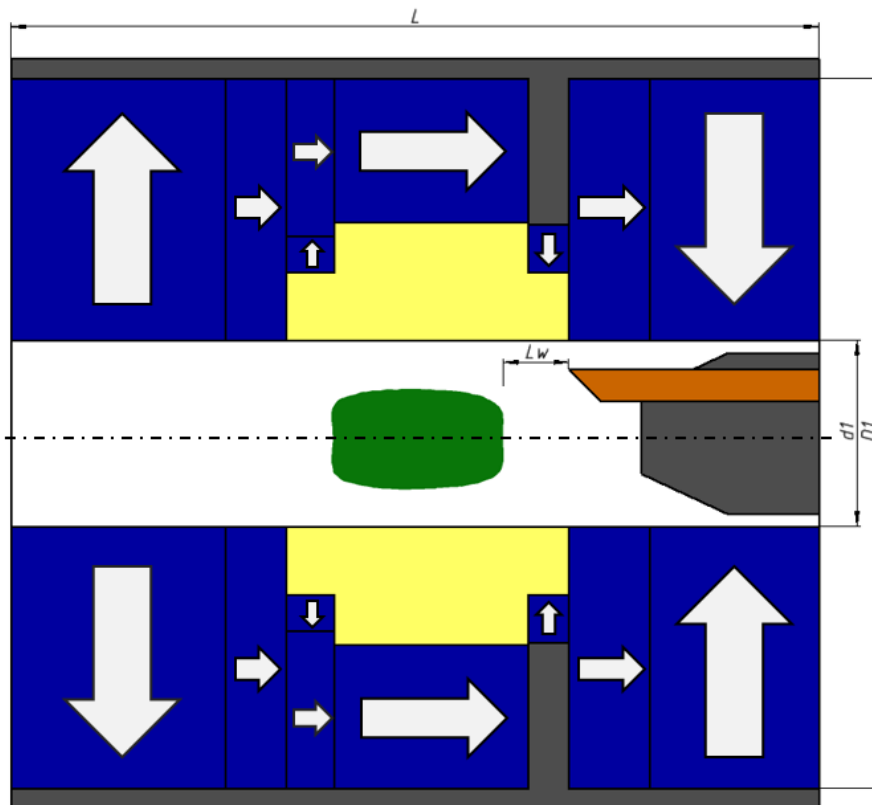


Рис. 1. Магнитная система источника. Синий – кольца для создания аксиального поля; Желтый – гексаполь; Серый – Сталь 10; Оранжевый – СВЧ ввод; Зеленый – область ЭЦР; Стрелки – Вектор намагниченности

Определено оптимальное положение ввода СВЧ, при котором значение отраженной мощности минимально. Значение напряженности электрического поля в области ЭЦР составило 52 кВ/м при уровне вводимой мощности 100 Вт.

Численное моделирование проводилось с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics [3].

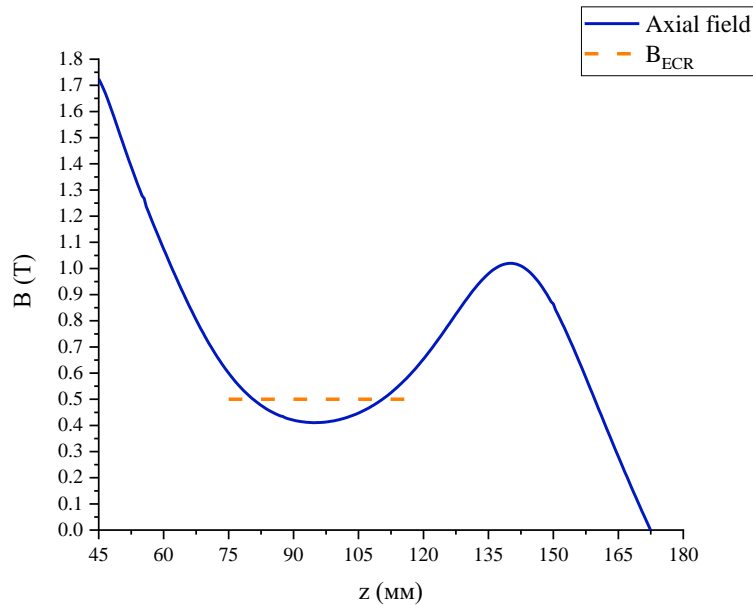


Рис. 2. Распределение магнитного поля на оси источника

Результаты

В таблице 1 представлены параметры магнитной системы, полученные в ходе моделирования, а также положение СВЧ ввода, при котором получается минимальное отражение мощности (L – длина магнитной системы, D_I – диаметр магнитной системы, d_I – диаметр камеры источника, m – масса магнитной системы, L_w – расстояние от ЭЦР зоны до волновода, r_w – положение волновода относительно оси камеры, P – падающая мощность, P_{ref} – коэффициент отраженной мощности).

Таблица 1

Параметры магнитной системы компактного 14 ГГц ЭЦР-источника ионов

L , мм	D_I , мм	d_I , мм	B_{inj} , Т	B_{ext} , Т	B_{min} , Т	B_{rad} , Т	m , кг	L_w , мм	r_w , мм	P , Вт	P_{ref} , %
200	176	46	1.74	1	0.4	1.13	38.47	20	11	100	2.51

Заключение

В результате проведенных исследований смоделирована магнитная система для 14 ГГц ЭЦР источника ионов. Магнитная система удовлетворяет условиям эффективного получения многозарядных ионов. Определено оптимальное положение ввода СВЧ, с минимальным коэффициентом отраженной мощности. Полученная конфигурация компактного 14 ГГц ЭЦР-источника ионов полностью удовлетворяет требованиям, необходимым для его размещения в ускорителе Ван де Граафа.

Список литературы

1. Gammino Santo. Production of intense beams of highly-charged ions // AIP Conference Proceedings. – Upton, New York (USA). – 2001. – Vol. 572, № 1. – P. 272–281.
2. ARNOLD MAGNETIC TECHNOLOGIES. Neodymium Iron Boron Magnet Catalog. – Текст: электронный // 2021. – №. Rev. 210607. – URL: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2019/06/Arnold-Neo-Catalog.pdf> (дата обращения: 29.02.2024).
3. COMSOL - Software for Multiphysics Simulation // COMSOL: сайт. – URL: www.comsol.com (дата обращения: 29.02.2024).