

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 537.563.2

### РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

© 2025 г. М. С. Дмитриев<sup>а</sup>, \*, М. В. Дьяконов<sup>а</sup>, А. С. Краснов<sup>а</sup>

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

\*E-mail: msdmitriyev@mephi.ru

Поступила в редакцию 26.06.2023 г.

После доработки 26.04.2024 г.

Принята к публикации 22.05.2024 г.

Разработана система экстракции и формирования пучка лазерного источника ионов. Проведена оптимизация параметров системы электродов. Проведено моделирование динамики пучка в источнике для легких ионов с различными зарядностями.

**Ключевые слова:** лазерный источник ионов, оптика Пирса, система экстракции

**DOI:** 10.56304/S2079562924050105

#### ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших узлов линейного ускорителя ионов является источник заряженных частиц. Для получения легких ионов может быть использован источник на основе генерации плазмы под воздействием лазерного излучения. В НИЯУ МИФИ разрабатывается система экстракции и формирования пучка ионов для нового лазерного источника, предназначенного для получения легких до  $O^{5+}$  ионов. В работе представлены результаты численного моделирования системы экстракции пучка на основе пирсовской системы электродов [1].

#### 1. ПОСТРОЕНИЕ И РАСЧЕТ МОДЕЛИ

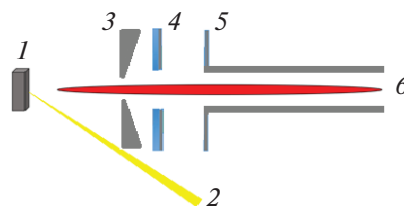
Для оценки эмиттанта и диаметра пучка была разработана 3D модель в среде проектирования CST Studio Suite. Модель позволяет отслеживать изменения основных характеристик пучка: эмиттанта и диаметра, при различных параметрах ЭЦР источника.

Схема экстрактора разрабатываемого лазерного ионного источника изображена на рис. 1. Лазерный луч попадая в мишень создает плазменное облако, распространяющееся в сторону извлекающей системы. С помощью системы электродов из плазмы извлекаются ионы, которые в последующем ускоряются и фокусируются на необходимом расстоянии.

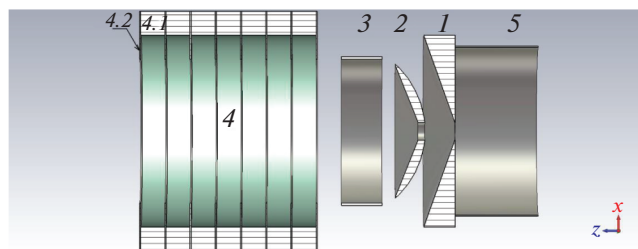
При выполнении работы необходимо было определить геометрию электродов с учетом распределения потенциалов в системе, создаваемого элементами конструкции вакуумной камеры, в ко-

торой находится система экстракции. Для этого в модели источника к электроду с нулевым потенциалом добавлена трубка, являющаяся частью канала транспортировки, и модель фланца вакуумной камеры, имеющего потенциал плазменного электрода, который так же вносит изменение в общее распределение потенциалов в системе. При проектировании экстрактора особое внимание стоит уделить откачке системы, поскольку большие газовые потоки, движущиеся в сторону вытягивающего электрода в ограниченном пространстве, могут негативно влиять на плазму.

В первую очередь было необходимо определить конструкцию электродов, позволяющих получить сфокусированный пучок. На выходе системы экстракции диаметр пучка должен быть не более 10 мм, эмиттанс менее 3 мм мрад. При моделировании необходимо учитывать собственное поле ионов. Энергия ионов на выходе источника должна составлять 40 кэВ/нуклон, от энергии зависит необходимое напряжение на плазменном



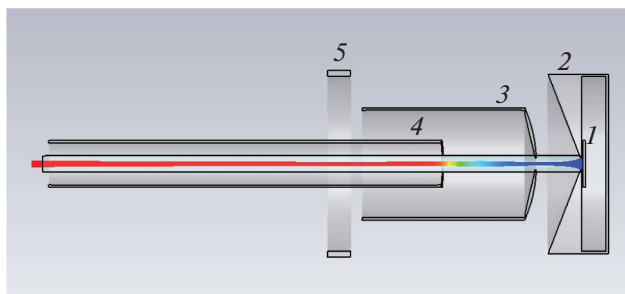
**Рис. 1.** Схема лазерного источника ионов: 1 – мишень, 2 – луч лазера, 3 – плазменный электрод, 4 – извлекающий электрод, 5 – пролетная трубка, 6 – пучок ионов.



**Рис. 2.** Схема расчетной модели первого варианта экстрактора: 1 – плазменный электрод, 2 – извлекающий электрод, 3 – промежуточный электрод, 4 – ускоряющая трубка, 4.1 – изолятор ускоряющей трубки, 4.2 – электрод ускоряющей трубки, 5 – трубка дрейфа.

электроде, например, для двухзарядного иона лития оно составляет 140 кВ. Ранее для лазерного источника было выполнено моделирование системы экстракции пучка на основе квазипирсовской системы электродов и ускоряющей трубки [2]. Схема расчетной модели показана на рис. 2. Была проведена оптимизация углов наклона электродов к оси пучка, формы извлекающих электродов, межэлектродных расстояний по минимуму эмиттанса, выполнено моделирование динамики пучков ионов в экстракторе. Для всех ионов, которые планируется получать в источнике, рассчитано значение эмиттанса пучка на выходе и его сечение, результаты приведен в табл. 1.

В дальнейшем было решено отказаться от ускоряющей трубки, вместо нее использован дополнительный электрод нулевым потенциалом. В результате получена более простая конструкция экстрактора с лучшими характеристиками, например, для ионов  $O^{5+}$  диаметр пучка в обоих слу-



**Рис. 3.** Схема расчетной модели экстрактора и траектория ионов  $Li^{2+}$  после извлечения: 1 – мишень, 2 – плазменный электрод, 3 – извлекающие электроды, 4 – пролетная трубка с нулевым потенциалом, 5 – элемент фиксации электродов, с потенциалом плазменного электрода.

чаях составил 5 мм, но при этом эмиттанс пучка удалось уменьшить с 6.7 до 2.1 мм мрад. Схема расчетной модели вместе с траекторией частиц представлена на рис. 3.

## 2.ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

Выполнялась оптимизация параметров плазменного электрода, извлекающего электрода экстрактора, потенциалов, геометрии электрода с нулевым потенциалом с учетом необходимости экранирования пролетных участков от высокопотенциальных элементов конструкции экстрактора. Пример распределения потенциалов в системе показан на рис. 4.

Проведена оптимизация радиусов электродов, углов наклона, расстояний и их потенциалов. В результате получена усовершенствованная версия модели экстракции лазерного источника ионов.

**Таблица 1.** Параметры пучка на выходе экстрактора с ускоряющей трубкой

Элемент	Зарядность	Среднеквадратичный поперечный эмиттанс, мм мрад	Диаметр пучка, мм	Напряжение платформы, кВ
Дейтерий	1	7.9	4.9	80
Литий	2	7.6	5.4	140
Бериллий	2	7.0	4.9	180
Бор	3	7.0	5.0	147
Углерод	4	6.9	4.8	120
Азот	5	6.3	4.9	112
Кислород	5	6.6	4.8	128

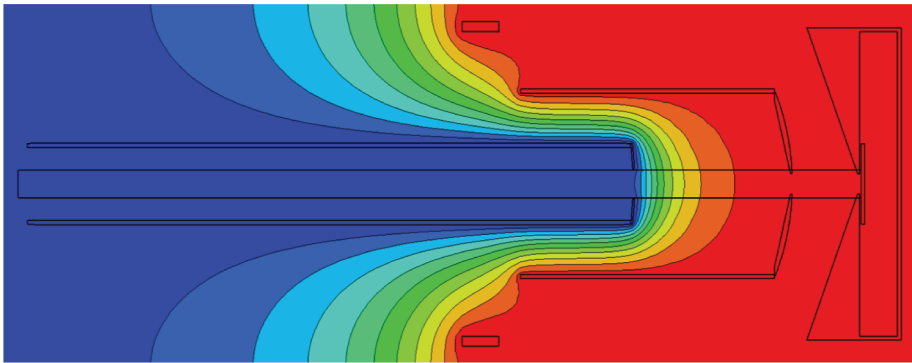


Рис. 4. Распределение потенциалов в системе экстракции.

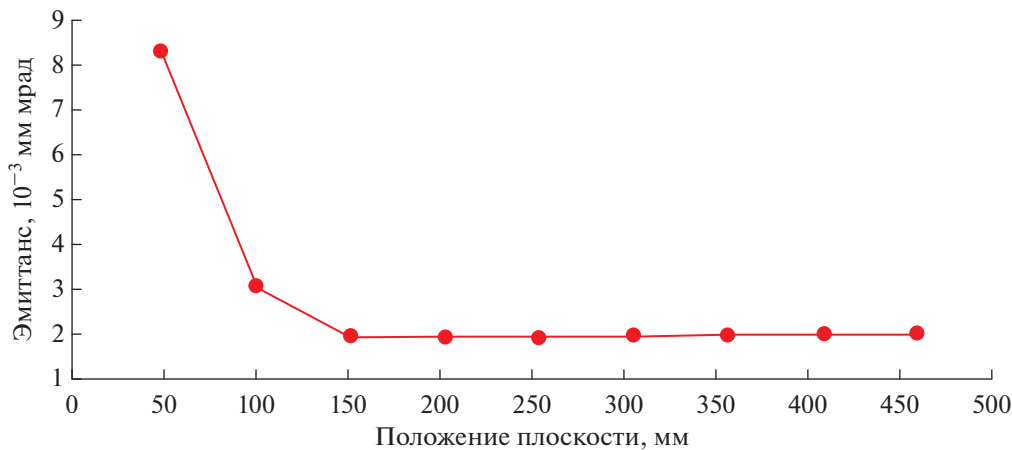


Рис. 5. Зависимость среднеквадратичного поперечного эмиттанса от координаты в системе извлечения для ионов  $\text{Li}^{2+}$ .

Рассчитана траектория движения частиц, сечение пучка и зависимость среднеквадратичного поперечного эмиттанса от координаты, приведенная на рис. 5. Диаметр пучка для всех типов ионов на выходе системы составляет менее 6 мм, эмиттанс менее 3 мм мрад, за исключением  $\text{D}^+$ , при

постоянной разности потенциалов между плазменным и извлекающим электродами, составляющей 6 кВ. В результате на выходе из системы на расстоянии 460 мм от плазменного электрода полученный пучок ионов  $\text{O}^{5+}$  имеет диаметр 5 мм и эмиттанс 2.1 мм мрад. Наименьший диаметр пучка и

Таблица 2. Параметры пучка на выходе экстрактора с электродом с нулевым потенциалом

Элемент	Зарядность	Среднеквадратичный поперечный эмиттанс, мм мрад	Диаметр пучка, мм	Напряжение платформы, кВ
Дейтерий	1	3.4	4.9	80
Литий	2	2.0	4.2	140
Бериллий	2	2.0	5.9	180
Бор	3	2.0	5.0	147
Углерод	4	2.1	4.9	120
Азот	5	2.2	5.1	112
Кислород	5	2.1	5.0	128

эмиттанс получен для двухзарядных ионов лития (табл. 2).

системы экстракции и формирования пучка лазерного источника ионов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты моделирования системы экстракции и формирования пучка для нового лазерного источника ионов. Благодаря проведенной оптимизации удалось снизить значение эмиттанса на выходе экстрактора до 3.4 мм мрад при диаметре пучка на выходе экстрактора, составившем до 5.9 мм. Будет проводиться дальнейшая оптимизация параметров си-

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Дмитриев М.С., Дьяконов М.В.* // Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2021: Сб. науч. тр. VII Международная конференция. 23–26 марта 2021, Москва. 2021. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”. С. 419–420.
2. *Форрестер А.Т.* Интенсивные ионные пучки. Пер. с англ. 1991. Москва: Мир.

## Development and Simulation of an Extraction System for a Laser Ion Source

M. S. Dmitriev<sup>1</sup>, \*, M. V. Dyachkov<sup>1</sup>, and A. S. Krasnov<sup>1</sup>

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

*\*e-mail: msdmitriyev@mephi.ru*

Received June 26, 2023; revised April 26, 2024; accepted May 22, 2024

**Abstract**—A system for the extraction and formation of a beam of a laser ion source has been developed. The parameters of the system of electrodes have been optimized. The dynamics of the beam in the source for light ions with different charge numbers has been simulated.

**Keywords:** laser ion source, Pearce optics, extraction system