

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 537.533.2

# КОАКСИАЛЬНЫЙ ИОННЫЙ ЭЦР-ИСТОЧНИК ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

© 2025 г. С. Г. Константинов<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Институт ядерной физики им Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

\* e-mail: s.g.konstantinov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 03.09.2024 г.

После доработки 17.09.2024 г.

Принята к публикации 14.10.2024 г.

Описывается устройство, представляющее собой ионный инжектор на основе ЭЦР-разряда в коаксиальном резонаторе. Его эффективность обусловлена применением нескольких оригинальных решений: использовано прямое подключение магнетрона к ионному источнику, оригинальная магнитная система имеет конфигурацию с точной настройкой на максимальный ионный ток, кроме того, она минимизирует зону горения у эмиссионного отверстия. Также существенно повышается ионный ток за счет применения керамических вставок в зоне разряда. В устройстве отсутствует стандартный тракт СВЧ, а генератор СВЧ (магнетрон) подключен непосредственно к петле связи коаксиального резонатора. Извлекаемый ток ионов водорода при вкладываемой в разряд СВЧ-мощности около 100 Вт составляет 8.5 мА.

DOI: 10.31857/S0032816225020137, EDN: GKNYJX

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ионные источники на основе электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) занимают доминирующее положение. В этих источниках, в отличие от источников дугового или тлеющего разрядов, не происходит эрозия стенок газоразрядной камеры. Это обеспечивает возможность их длительной работы. Вместе с тем стоимость их высока, а также требуется большое пространство для их размещения в высоковольтной части электростатического ускорителя.

Коаксиальные ионные источники, представленные в ранее опубликованных работах [1–3], не соответствуют требованиям, предъявляемым к научным и промышленным электростатическим ускорителям.

Источник должен иметь большой ресурс непрерывной работы, поскольку вскрытие бака под давлением – весьма трудоемкая процедура.

Существует “классическая” схема питания ЭЦР-источника, которая состоит из элементов, обеспечивающих согласование импедансов

СВЧ-тракта и защиту магнетрона от разрушения мощностью отраженной волны.

Стандартная СВЧ-линия, обеспечивающая ввод мощности в ЭЦР-источник и согласование импедансов, содержит в себе согласующее устройство СВЧ-линии с магнетроном, волновод, циркулятор, тюнер, а также высоковольтный разрыв в волноводе [4], что требует значительного пространства для размещения этих элементов. Вместе с тем, когда повышенный ток ионов для ускорения не требуется, возникла привлекательная идея применить разряд в малогабаритном коаксиальном четвертьволновом резонаторе при небольшой вводимой мощности (существенно меньшей, чем требуется в случае “классического” ЭЦР-источника). При этом, если не позволять максимальному току магнетрона быть выше значения, при котором этот магнетрон может быть разрушен при полном отражении электромагнитной волны, то громоздкий циркулятор можно исключить из СВЧ-линии. Далее возникла идея объединить магнетрон с коаксиальным ионным источником в моноблок с подстройкой фазы волны за счет

длины антенны. Для этого необходимо ограничить максимальный ток источника питания магнетрона до уровня, необходимого для работы источника, но не разрушающего магнетрон при погасании разряда.

В коаксиальном резонаторе основным типом колебаний являются чисто поперечные колебания (TEM), для которых длина волны в передающей линии равна длине волны в свободном пространстве.

Применение коаксиального резонатора в качестве генератора плазмы также привлекательно с точки зрения его надежности и способности длительной работы, что особенно важно в случае применения в электростатическом ускорителе.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Требуется разработать ионный источник для электростатического ускорителя, имеющий небольшие размеры, надежный в эксплуатации и простой в обслуживании.

Потребляемая мощность должна быть минимизирована в связи со сложностью ее подачи под высокий потенциал. Охлаждение источника желательно организовать без использования охлаждающих жидкостей.

## 3. КОНСТРУКЦИЯ

Предлагаемый вариант ионного источника с триодной ионной оптикой изображен на рис. 1.

Коаксиальный четвертьволновой резонатор имеет волновое сопротивление 50 Ом, он подключен непосредственно к магнетрону с помощью петли связи через металлокерамический вакуум-плотный ввод. Имеется возможность подстройки фазы волны подбором длины вставки в линию антенны магнетрона, ребристый корпус которой служит также радиатором для воздушного охлаждения газоразрядной камеры. Магнетрон имеет охлаждение вентилятором. Штырь коаксиального резонатора изготовлен из меди, он крепится к корпусу с помощью винта, за которым вставлены SmCo-магнит и керамический диск из нитрида бора. Такая вставка существенно снижает рекомбинацию атомов в разряде.

Магнитная система источника состоит из внешнего кольца с аксиальным направлением силовых линий и внутреннего магнита, вставленного в штырь резонатора. Суперпозиция полей постоянных магнитов изображена на рис. 2.

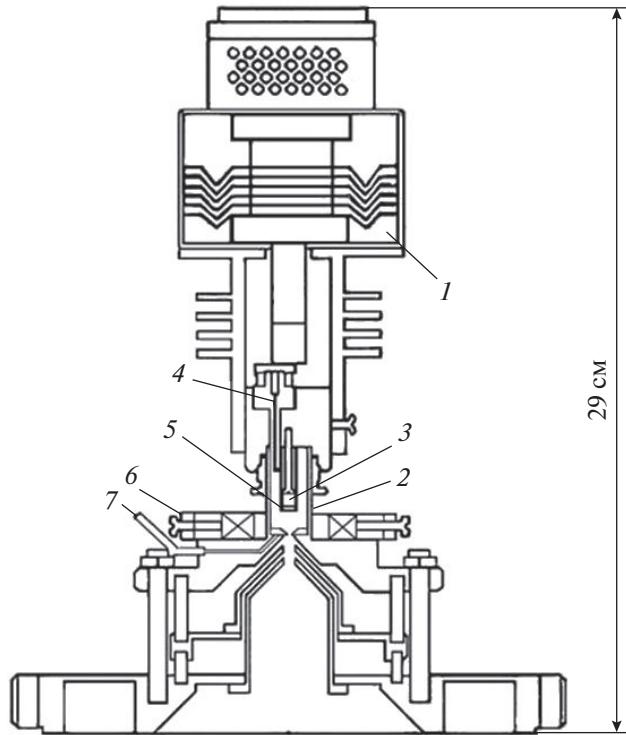


Рис. 1. Схема источника: 1 – магнетрон, 2 – газоразрядная камера, 3 – штырь резонатора с постоянным магнитом, 4 – петля связи, 5 – керамическая вставка из нитрида бора, 6 – магнитное кольцо с настройкой величины магнитного поля на оси, 7 – подача газа.

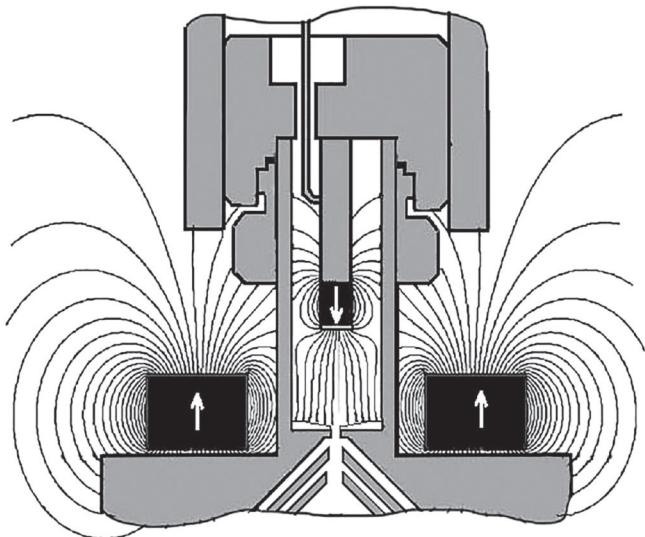


Рис. 2. Распределение магнитного поля ионного источника.

Четыре магнитных бруска внешнего кольца с помощью винтов перемещаются по радиусу, обеспечивая совместно со встречно намагниченным постоянным цилиндрическим магни-

том внутри штыря электронно-циклотронный резонанс в области эмиссионного отверстия. Магнитное поле на оси разряда равно 0.0875 Тл, что соответствует электронно-циклотронному резонансу на частоте генерации магнетрона (2.45 ГГц).

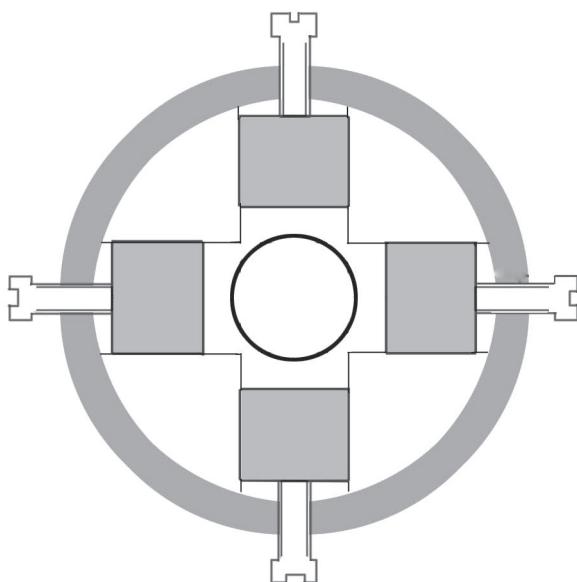


Рис. 3. Схема магнитного кольца с настройкой величины продольного магнитного поля на оси.

Движение магнитов от центра осуществляется за счет расталкивающей силы (рис. 3). Эмиссионный электрод также закрыт изнутри диском из нитрида бора с отверстием. Вытягиваемый ионный пучок формируется с помощью триодной оптической системы. Внешний вид ионного источника показан на рис. 4.

#### 4. БЛОК ПИТАНИЯ МАГНЕТРОНА

На рис. 5 представлена простая схема компактного блока питания магнетрона для стендо-вой работы на основе высокочастотного инвертора, работающего при частоте 30 кГц. Поскольку магнетрон находится под высоким ускоряющим потенциалом, вторичные обмотки накала магнетрона и высокочастотного трансформатора инвертора Тр2 имеют высоковольтную изоляцию. Максимальный ток анода не превышает 50 мА, что обеспечивает сохранность магнетрона при любых режимах работы источника.

#### 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

Во время работы по оптимизации конструкции ионного инжектора определялись размеры элементов ионного источника с целью полу-

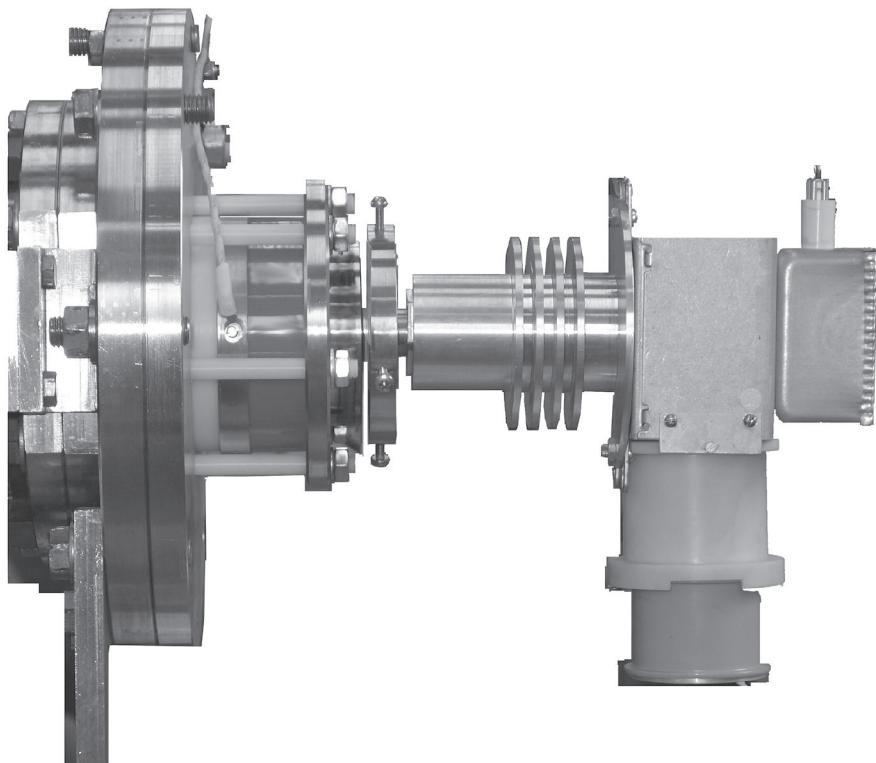


Рис. 4. Внешний вид ионного источника.

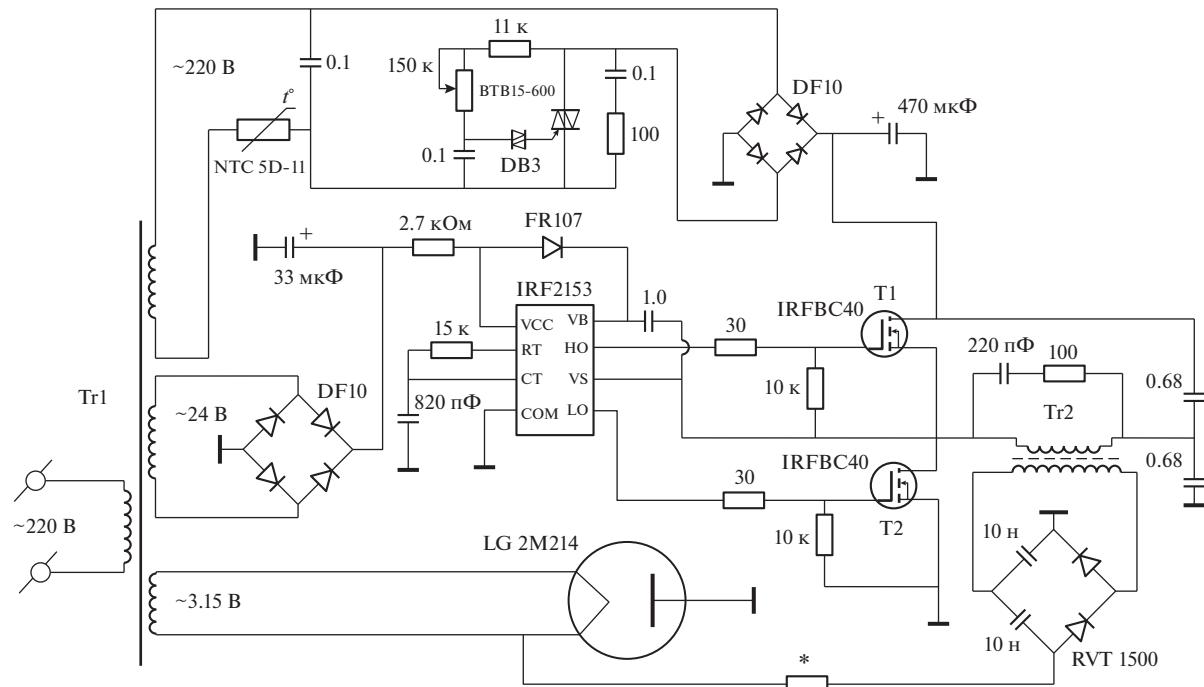


Рис. 5. Схема блока питания магнетрона.

чения максимального ионного тока при минимальной входящей мощности СВЧ.

Установлена довольно высокая чувствительность настройки винтами магнитной системы на максимальный ток, что объясняется сильной зависимостью величины магнитного поля на оси от положения магнитов.

Определены оптимальные размеры элементов коаксиального резонатора: длина штыря – 30 мм, длина петли связи – 14 мм, диаметр штыря – 6.3 мм, внутренний диаметр газоразрядной камеры – 16 мм.

Получен пучок ионов водорода с силой тока 8.5 мА при вытягиваемом напряжении 13 кВ, при этом расход газа был около  $2 \text{ см}^3/\text{мин}$  а ток магнетрона – до 50 мА. Доля протонов в пучке составляла 26.4%.

Невысокая доля протонов в пучке объясняется тем, что при миниатюризации ионного источника снижается его эффективность (это связано с увеличением отношения площади поверхности к объему разрядной камеры), что сокращает эффективную продолжительность удержания высокоэнергетических “первичных” электронов, которая необходима для эффективной генерации плазмы. Состав ионного пучка измерялся методом, аналогичным описанному в работе [4].

Исследовалась также, аналогично работе [3], магнитная система, содержащая кольцо с ради-

альной намагниченностью. В этом случае максимальный извлекаемый ионный ток был приблизительно на порядок ниже.

На рис. 6 показана область, занимаемая СВЧ-разрядом. Видно, что его поперечный размер ограничен диаметром штыря коаксиального резонатора.

После длительной работы (более 200 ч) загрязнений внутри газоразрядной камеры не обнаружено.

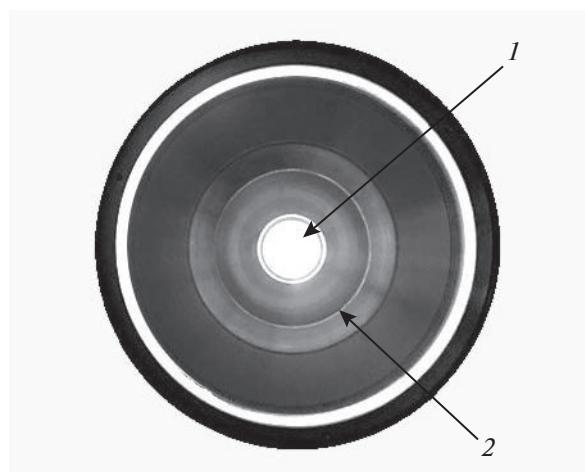


Рис. 6. Свечение разряда снаружи. Для наблюдения вставлена сетка вместо эмиссионного электрода: 1 – штырь резонатора, 2 – корпус газоразрядной камеры-резонатора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kimura T., Okazaki Y.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1996. V. 14. P. 3039.  
<https://doi.org/10.1116/1.580168>
2. *Latrasse L., Radoiu M., Nelis T., Antonin O.* // *J. Microw. Power Electromagn. Energy.* 2017. V. 51. P. 237.
3. *Fatkullin R., Bogomolov S., Kuzmenkov K., Efremov A..* // *EPJ Web of Conferences.* 2018. V. 177. P. 08003.  
<https://doi.org/10.1051/epjconf/201817708003>
4. *Константинов С.Г.* // *ПТЭ.* 2019. № 1. С. 5.  
<https://doi.org/10.1134/S0032816218060241>