

**Сильноточные импульсные ЭЦР-источники ионов**

*В. А. Скалыга, С. В. Голубев, И. В. Изотов, Р. Л. Лапин, С. В. Разин,  
А. В. Сидоров, Р. А. Шапошников*

*В настоящее время в ряде ионных электронно-циклотронных резонансных (ЭЦР) источников для создания и нагрева плазмы используется мощное микроволновое излучение современных гиротронов. Вследствие большой мощности излучения такие системы работают в основном в импульсном режиме. Этот тип ионных ЭЦР-источников был разработан в Институте прикладной физики Российской академии наук, и большая часть экспериментальных исследований была выполнена на установке SMIS 37. Для создания плазмы на SMIS 37 использовались гиротроны с частотами 37,5 и 75 ГГц и максимальными мощностями 100 и 200 кВт, соответственно. Такое микроволновое излучение позволяло создавать плазму с уникальными параметрами: электронной плотностью более  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, электронной температурой 50–300 эВ, ионной температурой около 1 эВ. Принципиальное отличие этих систем от традиционных ЭЦР-источников состоит в реализации так называемого квазигазодинамического режима удержания плазмы в ловушке. В соответствии с режимом удержания такие источники были названы «газодинамическими ЭЦР-источниками». В этих системах время жизни плазмы обычно составляет несколько десятков микросекунд, что в сочетании с высокой электронной концентрацией приводит к формированию плазменных потоков из ловушки с плотностями до 1–10 А/см<sup>2</sup>. Была продемонстрирована возможность создания пучков МЗИ (азот, аргон) и протонных (дейтронных) пучков с токами на уровне сотен мА при среднеквадратичном нормализованном эмиттансе порядка 0,1 пк·мм·мрад. Следующим шагом в исследованиях является переход к непрерывному режиму работы газодинамического ионного ЭЦР-источника (ЭЦР ИИ). С этой целью в ИПФ РАН создаётся новая экспериментальная установка. Для получения плазмы в будущем источнике будет использоваться излучение гиротронов на частотах 28 и 37,5 ГГц. В настоящей работе дан обзор полученных результатов и состояния дел по монтажу нового источника.*

*Ключевые слова:* ионный источник, сильноточные ионные пучки, ЭЦР-разряд, гиротрон.

**Ссылка:** Скалыга В. А., Голубев С. В., Изотов И. В., Лапин Р. Л., Разин С. В., Сидоров А. В., Шапошников Р. А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 17.

**Reference:** V. A. Skalyga, S. V. Golubev, I. V. Izotov, R. L. Lapin, S. V. Razin, A. V. Sidorov, and R. A. Shaposhnikov, Prikl. Fiz., No. 1, 17 (2019).

**Введение**

Получение ионных пучков высокой интенсивности из разряда на электронно-циклотронном

---

Скалыга Вадим Александрович, зав. лаб., д.ф.-м.н.  
Голубев Сергей Владимирович, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор.  
Изотов Иван Владимирович, м.н.с., к.ф.-м.н.  
Лапин Роман Львович, ст. лаборант-исследователь.  
Разин Сергей Владимирович, с.н.с., к.ф.-м.н.  
Сидоров Александр Васильевич, с.н.с., к.ф.-м.н.  
Шапошников Роман Анатольевич, стажер-исследователь.  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук.  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.  
E-mail: skalyga.vadim@gmail.com

Статья поступила в редакцию 19 октября 2018 г.

---

© Скалыга В. А., Голубев С. В., Изотов И. В., Лапин Р. Л., Разин С. В., Сидоров А. В., Шапошников Р. А., 2019

резонансе (ЭЦР)) может быть реализовано в импульсном режиме с использованием существенно более высокого уровня мощности греющего излучения, чем в непрерывном режиме работы. Основной принцип состоит в следующем: ионный пучок с высокой плотностью тока может быть получен в случае плотного потока плазмы из магнитной ловушки, вызванного её большими потерями; большие потери подразумевают высокую мощность нагрева, необходимую для поддержания температуры электронов на уровне, обеспечивающем эффективную ионизацию.

В течение последних 20 лет в Институте прикладной физики (ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия) были проведены исследования импульсного ЭЦР-разряда в открытой магнитной ловушке в условиях мощного ЭЦР-нагрева излу-

чением гиротрона миллиметрового диапазона длин волн [1–5], которые теперь проводятся и в Лаборатории субатомной физики и космологии (LPSC, Гренобль, Франция) [6, 7]. Вначале исследования были направлены на разработку высоко-частотного ЭЦР-источника многозарядных ионов (ЭЦР ИИ) с выдающимися параметрами нагрева плазмы (37,5 ГГц, 100 кВт). Согласно скейлингу Желлера [8], такое увеличение частоты и мощности по сравнению с традиционными ЭЦР-источниками должно было повысить производительность ЭЦР ИИ и обеспечить значительный прогресс в их развитии. Однако из-за небольшой длительности импульса ( $< 1$  мс) и низкой частоты повторения (0,1 Гц) пробойные и разрядные условия, аналогичные имеющим место в традиционных ЭЦР-источниках, были недостижимы. Минимальное давление нейтрального газа было на два порядка выше ( $10^{-4}$  мбар), а параметры плазмы значительно отличались от таковых в классических ЭЦР ИИ. В результате длительных исследований был создан новый тип ионного источника – сильноточный газодинамический ионный источник.

Следующим шагом в исследованиях является переход к непрерывному режиму работы газодинамического ионного ЭЦР-источника (ЭЦР ИИ). С этой целью в ИПФ РАН создаётся новая экспериментальная установка. Для получения плазмы в будущем источнике будет использоваться излучение гиротронов на частотах 28 и 37,5 ГГц.

Целью данной работы является представление обзора полученных результатов и состояния дел по монтажу нового источника.

### Квазигазодинамический режим удержания плазмы

Использование мощного излучения миллиметрового диапазона длин волн позволяет значительно увеличить плотность плазмы в разряде (пропорциональную квадрату частоты излучения [4–9]) по сравнению с традиционными ЭЦР ИИ, которые используют микроволновое излучение с частотами порядка 10 ГГц [8]. В экспериментах с частотами излучения гиротронов в диапазоне 37,5–75 ГГц концентрация электронов достигает значений  $10^{13}$ – $10^{14}$  см<sup>-3</sup> [10, 11]. Значительное увеличение плотности плазмы приводит к изменению режима её удержания в магнитной ловушке.

В описываемых ниже экспериментах было реализовано так называемое квазигазодинамическое удержание [4, 5] вместо бесстолкновительного удержания [12], характерного для современных классических ЭЦР ИИ. Переход от бесстолкновительного к квазигазодинамическому удержанию происходит, когда плотность плазмы стано-

вится достаточно велика, так что скорость рассеяния электронов в конус потерь в результате столкновений превышает максимально возможную скорость потерь электронов, связанную с вытеканием плазмы из ловушки через магнитные пробки с ионно-звуковой скоростью [13]. В такой ситуации конус потерь в пространстве скоростей заполнен, а время жизни плазмы не зависит от скорости столкновительного рассеяния электронов в конус потерь [13]. Время жизни плазмы, которое намного меньше, чем в традиционных ЭЦР ИИ, может быть выражено как  $\tau = (LR) / (2V_{is})$ , где  $L$  – длина магнитной ловушки,  $R$  – пробочное отношение (отношение величины магнитного поля в магнитной пробке и в центре ловушки) и  $V_{is}$  – скорость ионного звука. Малое время жизни плазмы обеспечивает высокую плотность плазменного потока из ловушки. Благодаря высокой плотности плазмы параметр удержания  $N\tau$ , определяющий степень ионизации и средний ионный заряд, может достигать значений  $10^8$ – $10^9$  (см<sup>-3</sup> с), что достаточно для эффективной ионизации. В случае нагрева излучением миллиметрового диапазона длин волн крайне высокой частоты и, соответственно, существенно более высокой плотности плазмы, многократная ионизация возможна даже при небольших объёмах плазмы. ЭЦР-источники, работающие в условиях такого удержания плазмы, называются газодинамическими ЭЦР ИИ.

Возможности и перспективы газодинамического удержания были продемонстрированы на установке SMIS 37 [4, 5] и на прототипе SEISM [6, 7]. Было показано, что описанные особенности квазигазодинамического ЭЦР-разряда, поддерживаемого излучением миллиметрового диапазона длин волн, а именно, малое время жизни и высокая плотность плазмы, обеспечивают беспрецедентную плотность тока ионов до 800 мА / см<sup>2</sup>.

### Экспериментальная установка SMIS 37

Основная часть экспериментов, посвящённых рассматриваемой теме, была выполнена на установке SMIS 37. В течение ряда лет её конфигурация незначительно менялась, последняя схематически изображена на рис. 1. Плазма создаётся и поддерживается внутри вакуумной камеры диаметром  $d = 4$  см (помещена в магнитную ловушку) импульсным (1 мс) линейно поляризованным излучением гиротронов с частотой 37,5 ГГц или 75 ГГц и мощностью до 100 и 200 кВт соответственно. Магнитное поле пробочной конфигурации (или ловушка касп в некоторых экспериментах) создавалось с помощью импульсных соленоидов, расположенных на расстоянии 15 см друг от друга, обеспечивая пробочное отношение 5. Величина магнитного поля в пробках могла варьироваться в

диапазоне 1–4 Тл, тогда как резонансная напряженность поля составляет 1,34 Тл для 37,5 ГГц и 2,68 Тл для 75 ГГц. Микроволновое излучение вводится в камеру квазиоптически через кварцевое окно и специальную систему согласования, которая защищает окно от плазменного потока. Квазиоптический ввод представляется наилучшим способом транспортировки СВЧ-излучения высокой

мощности в ионный источник, особенно потому, что воздушные промежутки могут быть использованы в качестве дополнительного изолятора между высоковольтной плазменной камерой и микроволновым источником. В SMIS 37 используется импульсная подача газа, а газовая линия встроена в согласующую систему, то есть нейтральный газ вводится в осевом направлении.

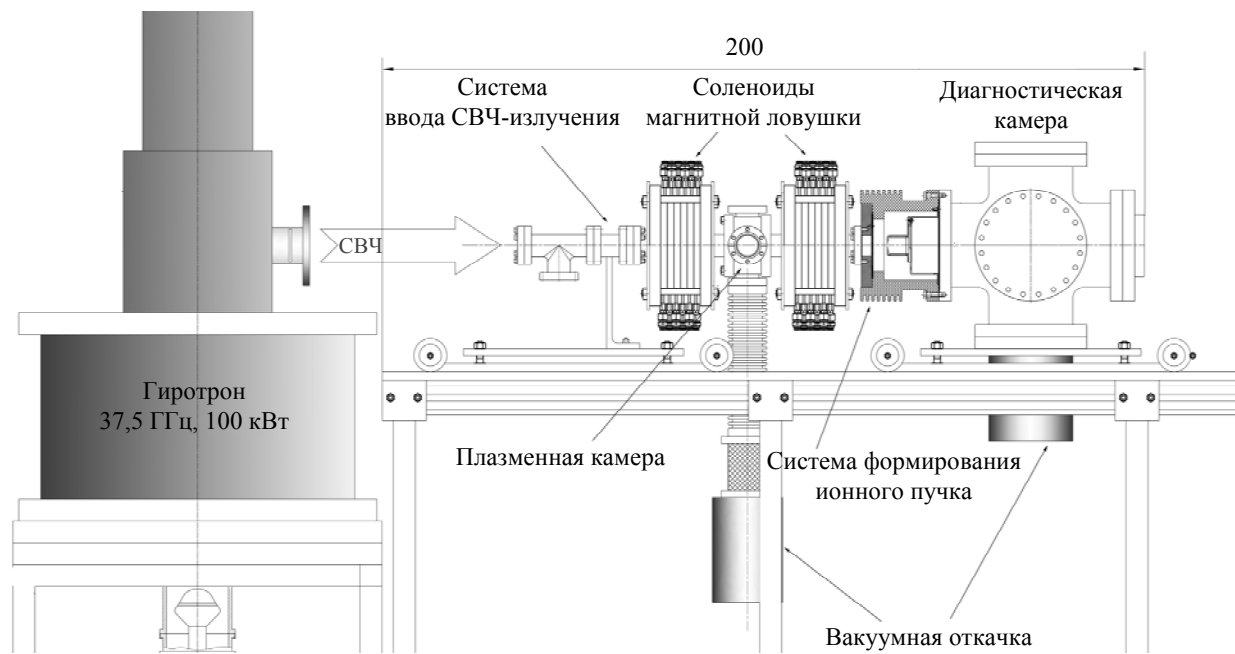


Рис. 1. Схема экспериментальной установки SMIS 37.

Экстракция ионов и формирование пучка осуществляется с помощью одно- и многоапертурных двухэлектродных (диодных) систем, состоящих из плазменного электрода и пуллера. Диаметр отверстия в плазменном электроде варьируется от 1 до 10 мм. Расстояние между системой экстракции и магнитной пробкой могло изменяться, что позволяло варьировать плотность потока плазмы на плазменный электрод. Максимальное напряжение экстракции составляло 100 кВ. Цилиндр Фарадея с апертурой 85 мм располагался непосредственно за пуллером, чтобы перехватывать весь ионный пучок. Цилиндр оснащён электродом, экранирующим вторичные электроны. Для измерения ионного состава экстрагированного пучка использовался секторный отклоняющий  $42^\circ$ -магнит, расположенный в ионном тракте за диагностической камерой, а также времяпролётный анализатор (анализаторы не показаны на схеме установки).

### Получение многозарядных ионов

Созданию пучков многозарядных ионов на установке SMIS 37 был посвящен ряд работ [1–5]. В настоящей статье приводятся основные резуль-

таты, полученные несколько лет назад, которые демонстрируют характерные возможности источника. На рис. 2 представлен зарядовый ионный спектр в аргоне, полученный при ЭЦР-нагреве плазмы излучением гиротрона с частотой 37,5 ГГц и мощностью 100 кВт.

Последующие эксперименты в гелии продемонстрировали значительное увеличение среднего заряда ионов от 1 до 1,5 при переходе от нагрева излучением с частотой 37,5 ГГц (100 кВт) к нагреву на частоте 75 ГГц (200 кВт), что связано с увеличением плотности плазмы в газодинамическом режиме удержания при повышении микроволновой частоты.

В этих экспериментах для формирования пучка использовалась одноапертурная двухэлектродная система экстракции с отверстием диаметром 1 мм, обеспечивающая полный ионный ток до 10 мА [2]. Нормализованный эмиттанс пучка, измеренный методом «repper-pot», был порядка  $0,01 \pi \times \text{мм} \times \text{мрад}$ . Позже эксперименты были повторены с многоапертурной системой экстракции. Использовались электроды с 13 отверстиями диаметром 3 мм каждое. Максимальный ток пучка многозарядных ионов, полученного с помощью такой системы, достигал 200 мА.

Представленные результаты показывают, что газодинамический ионный источник способен производить пучки ионов средних кратностей ионизации ( $Q$  до  $+6$ ) с токами в сотни мА. Низкая величина эмиттанса и высокий ток таких пучков могут позволить использовать их в системах с обдиркой («stripper» и «charge-breeder»). Дальнейшее увеличение частоты микроволнового излучения является перспективным для получения высокоэнергетических пучков тяжёлых ионов со средним зарядом около  $+10$  и их инжекции в ускорители с секцией обдирки после первой ступени ускорения.

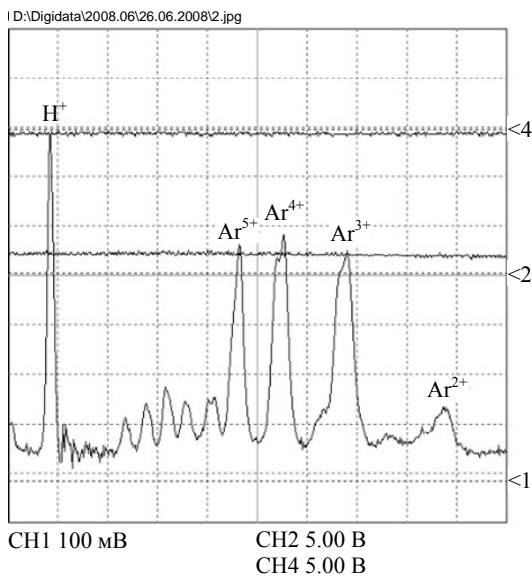


Рис. 2. Распределение ионов по кратностям ионизации в плазме аргона.

Современный ионный источник такого типа, названный «Прототип SEISM», был недавно построен в Гренобле в рамках международного сотрудничества между LPSC, ИПФ РАН и LNCMI (CNRS). Это первый ЭЦР ИИ с ЭЦР-зоной, представляющей собой замкнутую поверхность для частоты 60 ГГц с использованием радиально охлаждаемой магнитной системы. На этом прототипе были получены ионные пучки с уникальными интенсивностями, например, 1,1 мА ионов  $O^{3+}$  через отверстие 1 мм, что соответствует плотности тока  $140 \text{ мА/см}^2$  [7]. В первых экспериментах наблюдались также значительные токи высокозарядных ионов, таких как  $O^{5+}$ . Дальнейшие исследования на этой экспериментальной установке должны продемонстрировать предельную производительность газодинамических ЭЦР-источников ионов.

### Короткоимпульсные ионные пучки

Многие современные технологии и фундаментальные исследования требуют создания ион-

ного источника, способного генерировать короткоимпульсные (20–100 мкс), высокоэнергетические (десятки и сотни миллиампер) пучки ионов тяжёлых газов с достаточно высоким средним зарядом и малым эмиттансом. В этом отношении наиболее перспективными представляются газодинамические ЭЦР-источники многозарядных ионов. Для получения коротких импульсов в нестационарном режиме генерации можно использовать так называемый эффект «preglow» [14–17], при котором на начальной стадии разряда наблюдается всплеск тока экстрагируемого пучка многозарядных ионов с амплитудой, в несколько раз превышающей стационарное значение. Кроме того, в [18] было обнаружено, что в случае, когда длительность импульса гиротрона меньше или порядка характерного времени формирования пика «preglow», ионный ток из ловушки возникает преимущественно после окончания СВЧ-накачки в виде интенсивного короткого всплеска. По-видимому, подобный эффект наблюдался ранее в [19] и был назван режимом «микроимпульсов». В экспериментах, проведенных на SMIS 37, было продемонстрировано, что газодинамический ЭЦР-источник ионов, работающий в таком режиме «микроимпульсов», способен создавать пучки многозарядных ионов длительностью менее 100 мкс. Осциллограмма тока пучка ионов  $Ar^{5+}$  показаны на рис. 3.

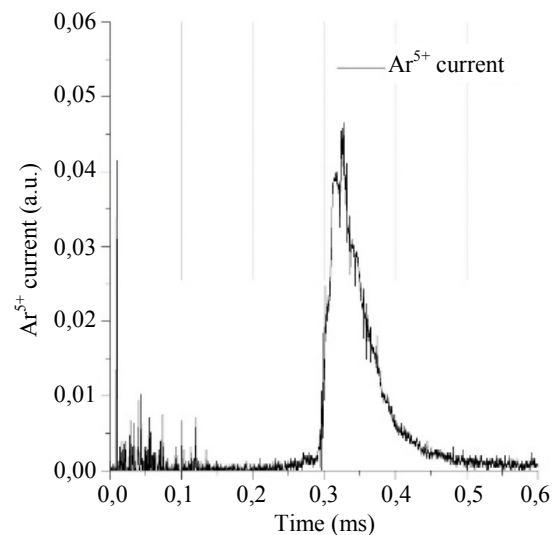


Рис. 3. Осциллограмма тока пучка ионов аргона  $Ar^{5+}$ .

Полный ток пучка, сформированный с помощью описанной выше многоапертурной системы экстракции, находился на уровне 200 мА.

Некоторые теоретические результаты, показывающие возможность высокой ионизационной эффективности при получении пучков ионов короткоживущих изотопов, были опубликованы в [20]. Было показано, что для нужд проекта Beta

Beam [21] газодинамический ЭЦР-источник в режиме «микроимпульсов» способен обеспечить эффективность использования до 50 % атомов изотопа  ${}^6\text{He}$  при создании пучков полностью ободанных ионов  ${}^6\text{He}^{2+}$ .

### Формирование протонных и дейтронных пучков

Для работы мощных современных ускорителей часто требуются интенсивные протонные и дейтронные пучки [22, 23]. Новые установки, превосходящие по параметрам ускорители предыдущего поколения, обычно предназначены для работы с более высокими токами пучка. Однако увеличение интенсивности ионного пучка с одновременным сохранением малого поперечного эмиттанса является достаточно сложной задачей.

Для наиболее современных ускорителей требуются ионные пучки  $\text{H}^+$  или  $\text{D}^+$  (импульсные или непрерывные) с токами до сотен мА и нормализованным эмиттансом менее  $0,2 \pi \times \text{мм} \times \text{мрад}$  [22, 24]. Предыдущие эксперименты по получению тяжелых многозарядных ионов показали, что газодинамический ионный источник способен создавать ионные пучки с рекордной плотностью тока и умеренным зарядом ионов. В связи с этим было решено испытать газодинамический ЭЦР-источник на способность формировать пучки протонов и дейтронов. В предыдущих работах [25, 26] описаны эксперименты, в которых для формирования пучка использовалась одноапертурная система экстракции. Поскольку в наличии имелись только два пуллера с отверстиями 10 и 22 мм в диаметре, оптимизация конфигурации экстрактора проводилась путём изменения зазора между электродами. Наибольший диаметр отверстия в плазменном электроде составлял 10 мм. В этом случае оптимальный зазор между электродами оказался равным 6 мм, а диаметр отверстия пуллера 22 мм. Показано, что полный ток пучка остаётся относительно стабильным на уровне 450 мА в течение длительности микроволнового импульса. При этом использовалось ускоряющее напряжение 41,5 кВ. Поперечный эмиттанс имел среднеквадратичное значение  $0,07 \pi \times \text{мм} \times \text{мрад}$ . Аналогичные результаты были получены в дейтерии. Представленные результаты демонстрируют перспективы сильноточного газодинамического ЭЦР-источника для получения пучков легких ионов. Максимальная среднеквадратичная эмиттанс-нормализованная яркость экстрагированного пучка достигала  $100 \text{ A} / (\pi \times \text{мм} \times \text{мрад})^2$ . Как показано в [25], протонная

(дейтронная) фракция в экстрагированных пучках составляла около 94 %.

### Непрерывный режим. Экспериментальная установка «GISMO»

Основная часть проведённых к настоящему времени экспериментов была выполнена в импульсном режиме работы установок. В данном разделе приводятся первые результаты по исследованию работы газодинамического ЭЦР ИИ в непрерывном режиме. Предварительные исследования параметров плазмы непрерывного ионного источника проводились с использованием излучения гиротрона с частотой 24 ГГц и мощностью 5 кВт [27]. Полученные экспериментальные результаты продемонстрировали, что все преимущества газодинамического источника могут быть реализованы и при работе в непрерывном режиме. С целью совершенствования газодинамического ионного источника непрерывного действия в ИПФ РАН разработан и изготовлен новый экспериментальный стенд GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation – многоцелевой газодинамический ионный источник). Эта установка предназначена для создания непрерывных сильноточных ( $> 200 \text{ мА}$ ) ионных пучков с низким эмиттансом ( $< 0,2 \pi \times \text{мм} \times \text{мрад}$ ).

Схема экспериментальной установки показана на рис. 4. Ключевыми элементами установки являются непрерывные гиротроны с параметрами излучения 28 ГГц / 10 кВт и 37,5 ГГц / 20 кВт, изготовленные в НПП «Гиком» [28]. Эти микроволновые генераторы оснащены источниками питания, способными работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Для удержания плазмы используется магнитная ловушка на основе постоянных магнитов. Конфигурация магнитного поля вблизи оси системы представляет собой зеркальную ловушку с напряженностью поля в магнитных пробках 1,5 Тл и пробочным отношением, близким к 6. Расстояние между магнитными зеркалами составляет около 12 см. Для экстракции ионного пучка планируется использовать 3- или 4-электродную систему с максимальным ускоряющим напряжением до 100 кВ, что требует разработки соответствующей высоковольтной изоляции разрядной камеры от других частей установки. В связи с этим одним из ключевых элементов стенда является высоковольтная развязка по постоянному току микроволновой передающей линии. Было предложено реализовать квазиоптическую систему, показанную на рис. 4.

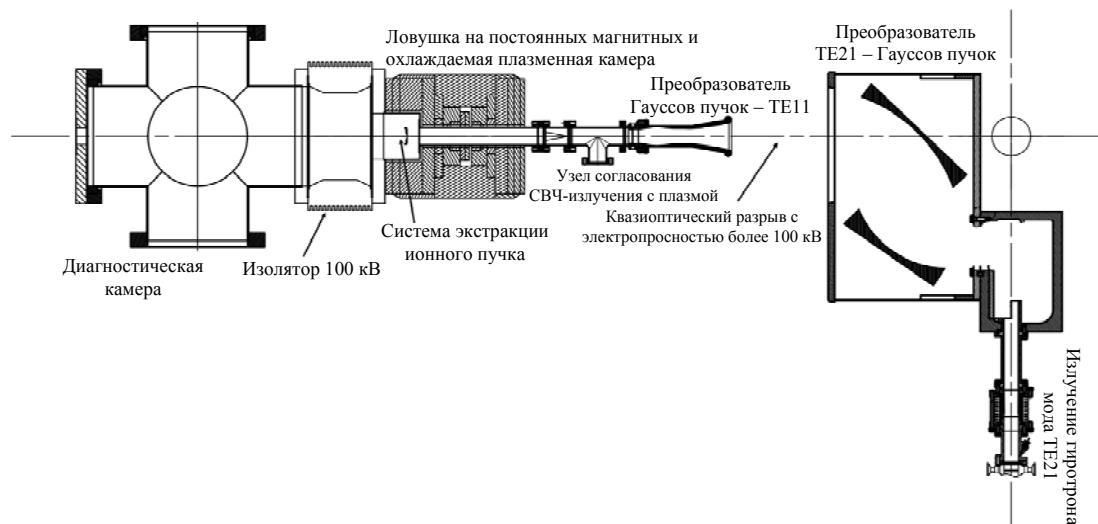


Рис. 4. Схема сильноточного ионного источника непрерывного действия GISMO 28/37.

Плазменная камера имеет длину 30 см и диаметр 4 см. Она оснащена водяным охлаждением по всей поверхности от согласующей системы до присоединительного фланца. Так как установка GISMO только вводится в эксплуатацию, первые экспериментальные результаты будут опубликованы позже.

### Заключение

Представленные результаты демонстрируют перспективные пути развития газодинамических ЭЦР ионных источников. Этот тип ЭЦР ИИ уже показал свои преимущества при создании пучков легких ионов. Дальнейшие исследования могут значительно улучшить его производительность при формировании пучков многозарядных ионов. Одним из наиболее перспективных новых ионных источников, который может продемонстрировать все возможности газодинамического удержания, является ЭЦР ИИ «SEISM», работающий на частоте 60 ГГц в LPSC, Гренобль. У этого источника есть ряд преимуществ по сравнению с SMIS 37. Во-первых, высокая частота повторения импульсов (до 2 Гц), что позволяет лучше контролировать параметры плазмы благодаря приемлемой очистке стенок вакуумной камеры. Во-вторых, магнитное поле большой величины (до 7 Тл) конфигурации касп с замкнутой ЭЦР-поверхностью. Таким образом, SEISM – это первый ионный источник, который может эффективно работать в газодинамическом режиме с замкнутой ЭЦР-поверхностью, что очень важно для удержания энергичных электронов.

Работа выполняется в рамках реализации  
Федеральной целевой программы

«Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-исследовательского комплекса России на 2014–2020 годы)», Соглашение № 14.604.21.0195 (уникальный идентификационный номер RFMEFI60417X0195).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Golubev S. V., Razin S. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 75. No. 5. P. 1675.
2. Golubev S. V., Izotov I. V., Razin S. V., Skalyga V. A., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Trans. Fusion Sci. Technol. 2005. Vol. 47. No. 1T. P. 345.
3. Sidorov A., Izotov I., Razin S., Skalyga V., Zorin V., Balabaev A., Kondrashev S., Bokhanov A. // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77. No. 3. P. 03A341-1.
4. Skalyga V., Zorin V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Bohanov A. // Plasma Sources Sci. Tech. 2006. Vol. 15. P. 727.
5. Golubev S., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Skalyga V., Vodopyanov A., Zorin V., Bokhanov A. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2007. Vol. 256. P. 537.
6. Marie-Jeanne M., Balint P., Fourel Ch., Giraud J., Jacob J., Lamy Th., Latrasse L., Sortais P., Thuillier Th., Daversin C., Debray F., Trophime Ch., Veys S., Izotov I., Skalyga V., Zorin V. / Proc. of the 20<sup>th</sup> International Workshop on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources ECRIS2012 (Sydney, Australia 2012). P. 111.
7. Lamy T., Jacob J., Angot J., Sole P., Thuillier T., Bakulin M., Ereemeev A. G., Izotov I., Movshevich B., Skalyga V., Debray F., Dumas J., Grandclement C., Sala P., Trophime C. / Proc. of the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology (Yokohama, Japan 2015). P. THM2101.
8. Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasma (Institute of Physics, Bristol, 1996).
9. Dorf M. A., Zorin V. G., Sidorov A. V., Bokhanov A. F., Izotov I. V., Razin S. V., Skalyga V. A. // Nuclear Instrum. and Meth. in Phys. Research (section A). 2014. Vol. 733. P. 107.
10. Golubev S. V., Razin S. V., Semenov V. E., Smirnov A. N., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2004. Vol. 71. P. 669.
11. Vodopyanov A. V., S Golubev. V., Khizhnyak V. I., Mansfeld D. A., Nikolaev A. G., Oks E. M., Yushkov G. Yu. // High Energy Phys. and Nucl. Phys. 2007. Vol. 31. No. S1. P. 152.

12. Пастухов В. Вопросы теории плазмы. – М: Энергоиздат, 1984.
13. Mirnov V. V., Ryutov D. D. // Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 1979. Vol. 5. P. 678.
14. Zorin V. G., Skalyga V. A., Izotov I. V., Razin S. V., Sidorov A. V., Lamy T., Thuillier T. // Trans. Fusion Sci. Technol. 2011. Vol. 59. P. 140.
15. Thuillier T., Lamy T., Latrasse L., Izotov I. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A., Zorin V. G., Marie-Jeanne M. // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. P. 02A314.
16. Izotov I. V., Sidorov A. V., Skalyga V. A., Zorin V. G., Lamy T., Latrasse L., Thuillier T. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36. P. 1494.
17. Skalyga V., Izotov I., Zorin V., Sidorov A. // Physics of Plasmas. 2012. Vol. 19. P. 023509.
18. Skalyga V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Zorin V. // Proceedings of the 8-th International Workshop «Strong microwaves and terahertz waves: sources and applications» (Nizhny Novgorod – St. Petersburg, Russia, July 9–16, 2011). P. 200.
19. Maunoury L., Adoui L., Grandin J. P., Noury F., Huber B. A., Lamour E., Prigent C., Rozet J. P., Vernhet D., Leherissier P., Pacquet J. Y. // Rev. Sci. Instrum. 2008. Vol. 79. P. 02A313.
20. Izotov I. V., Skalyga V. A., Zorin V. G. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. P. 02A342.
21. beta-beam.web.cern.ch
22. Gammino S., Celona L., Ciavola G., Mascali D., Miracoli R., Maimone F. / Proc. of LINAC2010, (Tsukuba, Japan, 2010), THP116.
23. Lindroos M., Bousson S., Calaga R., Danared H., Devanz G., Duperrier R., Eguia J., Eshraqi M., Gamino S., Hahn H., Jansson A., Oyon C., Pape-Moller S., Peggs S., Ponton A., Rathsmann K., Ruber R., Satogata T., Trahern G. // Nucl. Instrum. Methods B. 2011. Vol. 269. P. 3258.
24. Gobin R., Adroit G., Bogard D., Bourdelle G., Chauvin N., Delferriere O., Gauthier Y., Girardot P., Guiho P., Harrault F., Jannin J. L., Loiseau D., Mattei P., Roger A., Sauce Y., Senee F., Vacher T. // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. P. 02A345.
25. Skalyga V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Golubev S., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O. // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. No. 2. P. 02A702.
26. Skalyga V., Izotov I., Sidorov A., Razin S., Zorin V., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. // JINST. 2012. Vol. 7. P. P10010.
27. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Vodopyanov A., Tarvainen O. // Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. No. 2. P. 02A715.
28. www.gycom.ru

PACS: 52.50.Dg

## High-current pulsed ECR ion sources

V. A. Skalyga, S. V. Golubev, I. V. Izotov, R. L. Lapin, S. V. Razin,  
A. V. Sidorov, and R. A. Shaposhnikov

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), a Federal Research Center  
46 Ulyanova str., 603950, Nizhny Novgorod, Russia  
E-mail: Skalyga.vadim@gmail.com

Received October 19, 2018

*In present time, some ECR ion sources use a high frequency powerful microwave radiation of modern gyrotrons for plasma heating. Due to high radiation power such systems mainly operate in a pulsed mode. This type of ECR ion sources was developed at the Institute of Applied Physics of Russian Academy of Sciences and the most part of experimental research was performed at SMIS 37 facility. At SMIS 37 gyrotrons with 37.5 and 75 GHz frequencies and 100 and 200 kW maximum power respectively are used for plasma production. Such heating microwaves allow creating plasma with unique parameters: electron density  $> 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , electron temperature 50–300 eV, ion temperature about 1 eV. The principal difference between these systems from the conventional ECR sources is a so-called quasi-gasdynamic regime of plasma confinement. In accordance with the confinement regime such sources have been called "gas-dynamic ECR sources". Typically, plasma lifetime in such systems is about 10 microseconds, which in combination with the high plasma density leads to formation of the plasma fluxes from a trap with density up to 1–10 A/cm<sup>2</sup>. The possibility of multiply charged ion beams (nitrogen, argon) and proton (or deuterium) beams production with currents up a few hundreds of mA and normalized rms emittance about 0.1  $\pi$ -mm-mrad was demonstrated. The next step in the research is a transition to continuous wave (CW) operation. For this purpose, a new experimental facility is under construction at the IAP RAS. Future source will utilize 28 and 37.5 GHz gyrotron radiation for plasma heating. Overview of the obtained results and the status of the new source development will be presented.*

**Keywords:** ion source, high-current ion beams, ECR discharge, gyrotron.

## REFERENCES

1. S. V. Golubev, S. V. Razin, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, A. V. Vodopyanov, and V. G. Zorin, Review of Scientific Instruments **75** (5), 1675 (2004).
2. S. V. Golubev, I. V. Izotov, S. V. Razin, V. A. Skalyga, A. V. Vodopyanov, and V. G. Zorin, Transactions of Fusion Science and Technology **47** (1T), 345 (2005).
3. A. Sidorov, I. Izotov, S. Razin, V. Skalyga, V. Zorin, A. Balabaev, S. Kondrashev, and A. Bokhanov, Review of Scientific Instruments **77** (3), 03A341-1 (2006).
4. V. Skalyga, V. Zorin, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, and A. Bohanov, Plasma Sources Science and Technology **15**, 727 (2006).
5. S. Golubev, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, V. Skalyga, A. Vodopyanov, V. Zorin, and A. Bokhanov, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **256**, 537 (2007).
6. M. Marie-Jeanne, P. Balint, Ch. Fourel, J. Giraud, J. Jacob, Th. Lamy, L. Latrasse, P. Sortais, Th. Thuillier, C. Daversin, F. Debray, Ch. Trophime, S. Veys, I. Izotov, V. Skalyga, and V. Zorin, in *Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Workshop on Electron Cyclotron Resonance Ion Sources ECRIS2012* (Sydney, Australia 2012), pp. 111–113.
7. T. Lamy, J. Jacob, J. Angot, P. Sole, T. Thuillier, M. Bakulin, A. G. Ereemeev, I. Izotov, B. Movshevich, V. Skalyga, F. Debray, J. Dumas, C. Grandclement, P. Sala, and C. Trophime, in *Proceedings of the 13th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology*, p. THM2I01 (2015).
8. R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasma* (Institute of Physics, Bristol, 1996).
9. M. A. Dorf, V. G. Zorin, A. V. Sidorov, A. F. Bokhanov, I. V. Izotov, S. V. Razin, and V. A. Skalyga, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment) **733**, 107, (2014).
10. S. V. Golubev, S. V. Razin, V. E. Semenov, A. N. Smirnov, A. V. Vodopyanov, and V. G. Zorin, Rev. Sci. Instrum. **71**, 669 (2000).
11. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, V. I. Khizhnyak, D. A. Mansfeld, A. G. Nikolaev, E. M. Oks, and G. Yu. Yushkov, 2007 High Energy Phys. and Nucl. Phys. **31** (S1), 152 (2007).
12. V. Pastukhov, *Questions of Plasma Theory* (Energoatomizdat, Moscow, 1984) [in Russian].
13. V. V. Mirmov and D. D. Ryutov, Pisma v Zhurnal Theknicheskoi Fiziki **5**, 678 (1979).
14. V. G. Zorin, V. A. Skalyga, I. V. Izotov, S. V. Razin, A. V. Sidorov, T. Lamy, and T. Thuillier, Trans. Fusion Sci. Technol. **59**, 140 (2011).
15. T. Thuillier, T. Lamy, L. Latrasse, I. V. Izotov, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, V. G. Zorin, and M. Marie-Jeanne, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A314 (2008).
16. I. V. Izotov, A. V. Sidorov, V. A. Skalyga, V. G. Zorin, T. Lamy, L. Latrasse, and T. Thuillier, IEEE Trans. Plasma Sci. **36**, 1494 (2008).
17. V. Skalyga, I. Izotov, V. Zorin, and A. Sidorov Physics of Plasmas **19**, 023509 (2012).
18. V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, and V. Zorin in *Proceedings of the 8-th International workshop «Strong microwaves and terahertz waves: sources and applications»* (Nizhny Novgorod – St. Petersburg, Russia, July 9–16, 2011), pp. 200–201.
19. L. Maunoury, L. Adoui, J. P. Grandin, F. Noury, B. A. Huber, E. Lamour, C. Prigent, J. P. Rozet, D. Vernhet, P. Leherissier, and J. Y. Pacquet, Rev. Sci. Instrum. **79**, 02A313 (2008).
20. I. V. Izotov, V. A. Skalyga, and V. G. Zorin, Rev. Sci. Instrum. **83**, 02A342 (2012).
21. beta-beam.web.cern.ch
22. S. Gammino, L. Celona, G. Ciavola, D. Mascali, R. Miracoli, and F. Maimone, in *Proceedings of LINAC2010*, (Tsukuba, Japan, 2010), THP116.
23. M. Lindroos, S. Bousson, R. Calaga, H. Danared, G. Devanz, R. Duperrier, J. Eguia, M. Eshraqi, S. Gamino, H. Hahn, A. Jansson, C. Oyon, S. Pape-Moller, S. Peggs, A. Ponton, K. Rathsmann, R. Ruber, T. Satogata, and G. Trahern Nucl. Instrum. Methods B **269**, 3258 (2011).
24. R. Gobin, G. Adroit, D. Bogard, G. Bourdelle, N. Chauvin, O. Delferriere, Y. Gauthier, P. Girardot, P. Guiho, F. Harrault, J. L. Jannin, D. Loiseau, P. Mattei, A. Roger, Y. Sauce, F. Senee, and T. Vacher, Rev. Sci. Instrum. **83**, 02A345 (2012).
25. V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, S. Golubev, T. Kalvas, H. Koivisto, and O. Tarvainen, Review of Scientific Instruments **85** (2), 02A702 (2014).
26. V. Skalyga, I. Izotov, A. Sidorov, S. Razin, V. Zorin, O. Tarvainen, H. Koivisto, and T. Kalvas, JINST **7**, P10010 (2012).
27. V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Vodopyanov, and O. Tarvainen, Review of Scientific Instruments **87** (2), 02A715 (2016).
28. www.gycom.ru