

ЭЦР-разряд, поддерживаемый миллиметровым излучением, как источник плотных потоков плазмы

*С. В. Голубев, В. А. Скалыга, И. В. Изотов, Р. А. Шапошников, С. В. Разин,
А. В. Сидоров, А. Ф. Боханов, М. Ю. Казаков, Р. Л. Лапин, С. П. Шлепнёв*

В данной работе приводятся результаты исследований по формированию плотных потоков водородной плазмы ЭЦР-разряда в магнитном поле одиночного соленоида. Показана возможность формирования однородных потоков с плотностью 750 mA/cm^2 и полным током 5 А. Приводятся результаты первых экспериментов по формированию пучка ионов водорода из плазмы ЭЦР-разряда в одной магнитной катушке. Получены рекордные значения плотности тока в пучке свыше $1,5 \text{ A/cm}^2$. Представленные результаты свидетельствуют о перспективности использования рассмотренной системы в приложениях по созданию инжекторов высокоэнергетических нейтралов для нагрева плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза.

Ключевые слова: сильноточный ионный источник, ЭЦР-разряд, поток плазмы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-12-18

Введение

Нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза с магнитным удержанием за счет инжекции высокоэнергетического потока нейтралов в плазму поперек силовых линий магнитного поля является в настоящее время одним из основных методов

дополнительного нагрева. Ключевым элементом систем нейтральной инжекции является источник плазмы, из которой формируется сильноточный пучок ионов, который затем ускоряется, нейтрализуется и вводится в нагреваемую плазму. Требования к источнику плазмы постоянно повышаются - необходимы источники, способные производить однородные плазменные потоки с высокой плотностью, позволяющие формировать пучки ионов с током в сотни ампер. В свою очередь, это накладывает серьезные требования на источник плазмы, который должен обеспечивать однородный поток плазмы с соответствующей апертурой, плотностью потока ионов в нем вплоть до 1 A/cm^2 и состоящий преимущественно из атомарных ионов.

В настоящее время в большинстве нейтральных инжекторов для формирования плазмы применяется ВЧ-разряд [1, 2]. Однако параметры такого разряда далеки от оптимальных для формирования потока плазмы с предельной степенью ионизации. Так, максимальная температура электронов даже в случае качественного согласования электромагнитного излучения с плазмой не превышает 10 эВ и не может обеспечить требуемых ха-

Голубев Сергей Владимирович, гл.н.с., д.ф.-м.н.
 Скалыга Вадим Александрович, зав. отделением, д.ф.-м.н.
 Изотов Иван Владимирович, зав. лаб., к.ф.-м.н.
 Шапошников Роман Анатольевич, стажер-исследователь.
 E-mail: shaposhnikov-roma@mail.ru
 Разин Сергей Владимирович, с.н.с., к.ф.-м.н.
 Сидоров Александр Васильевич, с.н.с, к.ф.-м.н.
 Боханов Алексей Феликсович, зав. лабораторией.
 Казаков Михаил Юрьевич, ведущий электроник.
 Лапин Роман Львович, стажер-исследователь.
 Шлепнёв Сергей Петрович, ведущий электроник.
 Федеральный исследовательский центр
 Институт прикладной физики Российской академии наук.
 Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

Статья поступила в редакцию 02 июля 2021 г.

© Голубев С. В., Скалыга В. А., Изотов И. В., Шапошников Р. А., Разин С. В., Сидоров А. В., Боханов А. Ф., Казаков М. Ю., Лапин Р. Л., Шлепнёв С. П., 2021

рактических потоков. Кроме того, антенна-индуктор, обеспечивающая поддержание разряда, должна находиться в непосредственной близости от него, что приводит к необходимости размещения всего источника плазмы вместе с источниками питания на изолированной платформе, находящейся под высоким потенциалом, необходимым для ускорения ионного пучка. Это приводит к существенному усложнению и удорожанию системы в целом.

Альтернативным методом создания плазмы в системах нейтральной инжекции может стать разряд, поддерживаемый в открытой магнитной ловушке электромагнитным излучением в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Источники на основе такого разряда обеспечивают генерацию пучков ионов, в том числе, многозарядных, которые широко используются для инжекции в ускорители [3, 4].

В классическом ЭЦР-источнике разряд зажигается и поддерживается электромагнитным излучением сантиметрового диапазона длин волн, что обеспечивает создание плазмы с плотностью, не превышающей 10^{12} см^{-3} , с временем жизни на уровне 100 мс и высокой средней энергией электронов, которая может варьироваться в широком диапазоне от десятков эВ до нескольких кэВ, обеспечивая тем самым оптимальные условия для получения пучков ионов нужного сорта и заряда. Однако классические ЭЦР-источники из-за низкой плотности плазмы N и большого времени жизни τ не могут обеспечить необходимый для нейтральных инжекторов поток плазмы, который пропорционален отношению N/τ . В этой связи, для увеличения плазменного потока естественным представляется использовать для поддержания разряда более высоко-частотное излучение, что позволяет не только существенно поднять плотность плазмы (которая увеличивается пропорционально квадрату частоты поддерживающего разряд излучения), но и перейти от классического (бесстолкновительного) к так называемому квазигазодинамическому режиму удержания плазмы [5, 6] с существенно меньшим временем жизни. В таком режиме возможно поддержание сильнонеравновесной плотной плазмы с достаточно высокой энергией электронов (десятки-сотни эВ) и низкой температурой ионов, при этом длина свободного про-

бега электронов существенно превышает характерные размеры системы (электроны в плазме замагничены в отличие от широко известных газодинамических ловушек [7]), в то время как длина свободного пробега ионов существенно меньше этих размеров (динамика ионов определяется газодинамикой). В таких условиях «поперечное» время жизни плазмы, определяемое диффузией плазмы поперек магнитного поля, существенно превышает «продольное» τ , которое определяется газодинамическим выносом плазмы вдоль силовых линий магнитного поля с ионно-звуковой скоростью v_{is} , длиной ловушки L и пробочным отношением β (отношением величины напряженности поля в пробке ловушки и в ее центре – обычно в наших экспериментах 3–6) [8]:

$$\tau = \beta L / 2 v_{is}.$$

В работах [9–11] было показано, что в ЭЦР-разряде, поддерживаемом в простой магнитной ловушке (пробкотроне) излучением гиротронов с частотами 37,5 или 75 ГГц и мощностью 100 или 200 кВт соответственно, плотность плазмы может составлять от 10^{13} до 10^{14} см^{-3} при температуре электронов 30–100 эВ, что обеспечивает возможность формирования пучков атомарных ионов водорода с плотностями тока до 800 мА/см^2 и долей молекулярных ионов на уровне нескольких процентов.

Развитие предложенного подхода может быть связано с использованием для формирования интенсивных потоков плазмы ЭЦР-разряда с квазигазодинамическим режимом удержания наиболее простой магнитной системы – одиночной магнитной катушки. Использование одиночной магнитной катушки, в которой «поперечное» удержание ионов и «продольное» удержание электронов обеспечивается, по сути, самосогласованным распределением амбиполярного потенциала, позволяет получать предельно высокие интенсивности плазменных потоков, поскольку, по сравнению с традиционными открытыми магнитными ловушками, «продольное» время жизни плазмы уменьшается в несколько раз – пробочное отношение в случае одиночной катушки равно 1. Таким образом, использование ЭЦР-разряда, поддерживаемого мощным излучением гиротронов миллиметрового диапазона длин волн в одиночной катушке, может обеспечить по-

токи плазмы с концентрацией электронов порядка 10^{13} см^{-3} и предельно высокой степенью ионизации газа – более 90 %.

Кроме того, такая система выглядит привлекательно с точки зрения ее масштабирования (увеличения поперечных размеров, а следовательно, и полного потока), она свободна от плазменных неустойчивостей, удобна для реализации различных схем ввода СВЧ-излучения и извлечения ионного пучка.

В рамках данной работы приводятся результаты экспериментальных исследований широкоапертурных плотных потоков водородной плазмы, генерируемых ЭЦР-разрядом, поддерживаемым излучением гиротрона в магнитном поле одиночной катушки. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования такого разряда в системах нейтральной инжекции.

Описание экспериментальной установки

Исследования проводились в ИПФ РАН на модернизированной установке SMIS 37, схема которой приведена на рис. 1. Основные отличия от проведенных ранее экспериментов связаны с использованием для удержания плазмы простейшей магнитной системы – одиночной катушки с током. Магнитное поле в центре катушки могло изменяться от 1 до 3 Тл, длительность импульса тока в катушке составляла 6 мс. Разряд зажигался в условиях электронно-циклотронного резонанса в цилиндрической плазменной камере диаметром 68 мм и длиной 250 мм, помещенной в магнитную катушку. Для создания и поддержания

плазмы использовалось излучение гиротрона с частотой 37,5 ГГц, мощностью до 100 кВт и длительностью импульса 1,5 мс. Электромагнитное излучение в виде гауссова пучка линейной поляризации вводилось в вакуумный объем с помощью квазиоптической системы согласования миллиметрового излучения с плазмой. Напуск газа в разрядную камеру осуществлялся в импульсном режиме электромагнитным клапаном (характерная длительность переднего фронта потока газа составляла 3–5 мс) через специальный канал, встроенный в электродинамическую систему. Описанные системы согласования микроволнового излучения с плазмой и напуска газа идентичны тем, которые применялись в экспериментах с прямой магнитной ловушкой [9–11]. Часть вакуумной камеры, обеспечивающая ввод СВЧ-излучения в плазму, была также полностью заимствована от схемы экспериментов с прямой магнитной ловушкой. ЭЦР-значение магнитного поля для частоты внешнего электромагнитного излучения 37,5 ГГц составляет 1,34 Тл. Противоположный по отношению к вводу СВЧ-излучения торец плазменной камеры был закрыт металлической сеткой с прозрачностью 70 % с целью создания СВЧ-резонатора для улучшения эффективности нагрева плазмы. За сеткой вакуумный объем переходит в диагностическую камеру относительно больших размеров. Давление рабочего газа в плазменной камере в ходе экспериментов изменялось в диапазоне от 2×10^{-4} до 8×10^{-4} Торр. Давление остаточных газов в диагностической камере составляло порядка 10^{-6} – 10^{-7} Торр.

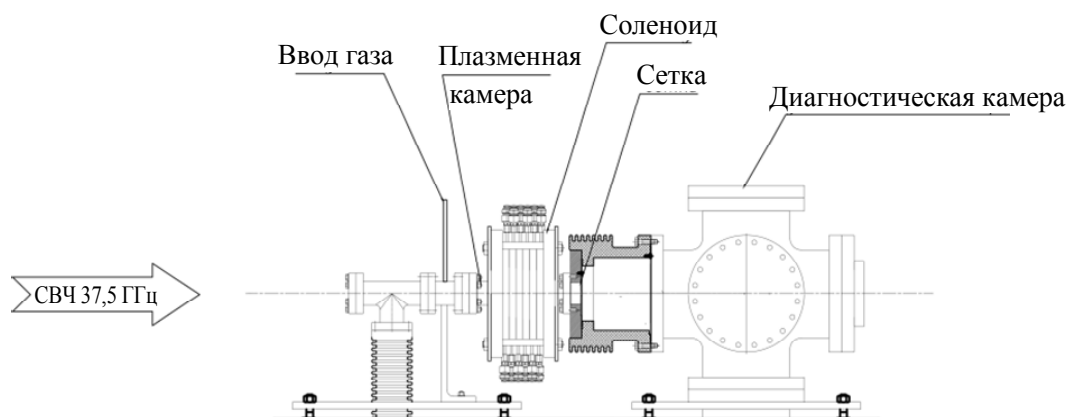


Рис. 1. Схема экспериментального стенда SMIS 37.

Результаты экспериментов

Экспериментальные исследования возможности получения в ЭЦР-разряде в одиночной катушке плазмы с высокой плотностью проводились с использованием бесконтактных спектральных методов диагностики. Так, измерения электронной концентрации проводились по уширению спектральных линий излучения плазмы, вызванного линейным эффектом Штарка. Уширение спектральных линий в плазме происходит за счет воздействия микрополей разделения зарядов (так называемых полей Хольцмарка) на состояние атомов и однозначно связано с величиной плотности плазмы [12, 13]. В описываемых экспериментах измерения проводились с использованием атомарных водородных линий серии Бальмера (переход с высоковозбужденных электронных уровней с главным квантовым числом $n = 3, 4$ и т. д. на уровень с главным квантовым числом $n = 2$). Линии этой серии (H_α (656,3 нм), H_β (486,1 нм), H_γ (434,1 нм), H_δ (410,1 нм) и другие) удобны тем, что практически все они лежат в видимом диапазоне и ближнем ультрафиолете. Обычно уширение линий H_α и H_β (переходы с уровней с $n = 3$ и 4 соответственно) уверенно измеряется с помощью серийных достаточно компактных спектрометров при концентрациях плазмы порядка $10^{15} - 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Однако при более низких концентрациях ($10^{13} - 10^{14} \text{ см}^{-3}$), которые характерны для условий описываемых экспериментов, уширения этих двух линий, как правило, уже недостаточно для достоверных измерений, и необходим экспериментальный анализ уширения более коротковолновых линий H_γ, H_δ

и других, так как расщепление электронного уровня в атоме водорода вследствие эффекта Штарка, которое и приводит к уширению контура линии излучения, при $n > 1$ пропорционально n^2 .

В экспериментах излучение ЭЦР-разряда через оптический фланец, установленный на правый торец диагностической камеры (см. рис. 1), направлялось в световод, соединённый со спектрометром MS 5204i (SOL Instruments), где и осуществлялся спектральный анализ. Спектрометр имел сменные дифракционные решётки (1800 штр/мм с длиной волны блеска 270 нм и 1200 штр/мм с длиной волны блеска 400 нм) и был способен регистрировать излучение в диапазоне 200–900 нм. Истинное уширение линии $\Delta\lambda_{\text{ист}}$, вызванное эффектом Штарка, связано с уширением, измеренным в эксперименте $\Delta\lambda_{\text{изм}}$, формулой $\Delta\lambda_{\text{ист}} = (\Delta\lambda_{\text{изм}}^2 - \Delta\lambda_{\text{апп}}^2)^{1/2}$, где $\Delta\lambda_{\text{апп}}$ – ширина аппаратной функции, в качестве которой было выбрано уширение линии H_γ (434,1 нм), а плотность плазмы определялась по линии H_δ (410,1 нм). Значения плотности плазмы, полученные таким образом, являются оценкой снизу.

Характерный спектр разряда приведен на рис. 2. В ходе проведенных измерений было установлено, что в оптимальных для формирования плотных потоков плазмы условиях концентрация электронов в разряде достигает значений $N_e \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что сопоставимо с критической концентрацией электронов для используемого микроволнового излучения, причем из сравнения измеренной плотности плазмы с результатами измерений давления газа в разрядной камере можно заключить, что степень ионизации была близка к 100 %.

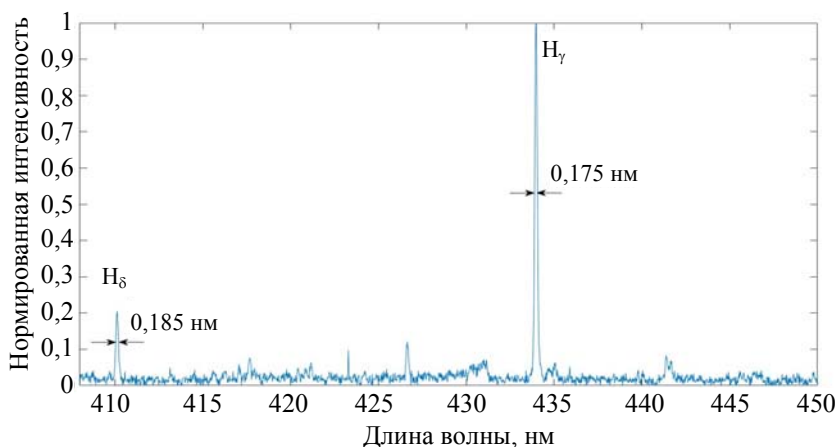


Рис. 2. Часть спектра излучения плазмы, содержащая линии H_γ и H_δ

Исследования характеристик потока плазмы, вылетающей из магнитной катушки, проводились с помощью подвижного зонда Ленгмюра (площадь собирающей поверхности $\sim 10 \text{ мм}^2$). Пространственное распределение потока плазмы было исследовано путём измерения ионного тока насыщения зонда, на который подавалось напряжение $U = -40 \text{ В}$ относительно диагностической камеры, находящейся под земляным потенциалом (отметим, что в сравнительно сильном магнитном поле ток в цепи зонда замыкался на ограничивающую разрядную камеру сетку). Таким образом, были измерены значения плотности потока плазмы на зонд в поперечном сечении на различных расстояниях относительно центра магнитной катушки. Максимальная плотность потока, которую удалось достичь при помощи оптимизации параметров напуска газа, составляла $j_{\text{max}} = 750 \text{ мА/см}^2$ на расстоянии 7,5 см от центра катушки. Это соответствовало ситуации, когда зонд располагался на расстоянии 0,5 см от сетки, ограничивающей разрядную камеру. Поперечное распределение потока плазмы приведено на рис. 3.

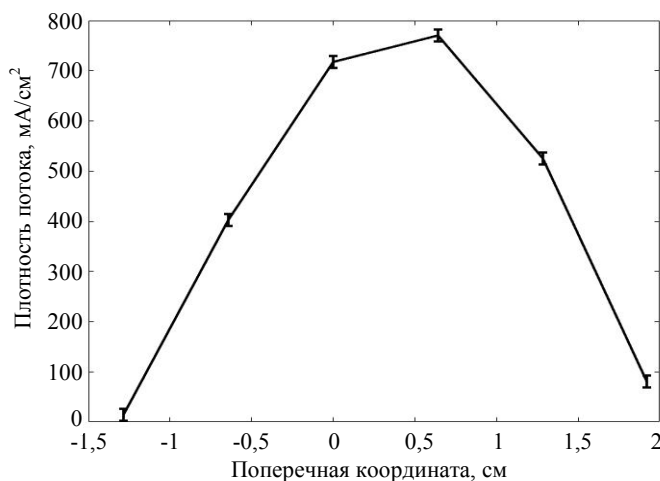


Рис. 3. Поперечное распределение плотности потока плазмы.

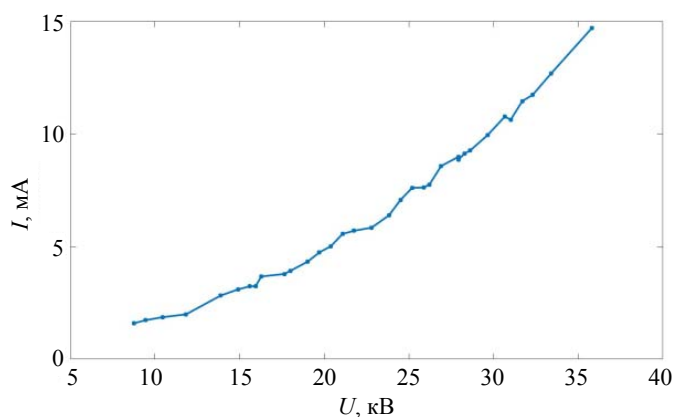


Рис. 4. Зависимость тока экстрагированного ионного пучка от напряжения экстракции.

Интегрирование поперечного профиля плотности позволяет получить значение полного тока ионов, который может быть экстрагирован из плазмы на данной установке. В случае максимальной плотности потока это значение достигает 5 А. Измерения полного тока на различных расстояниях от центра ловушки показали, что плазма разлетается вдоль силовых линий магнитного поля.

Для исследований возможностей формирования пучка ионов использовался двухэлектродный экстрактор, состоящий из плазменного электрода с диаметром отверстия 1 мм, расположенного вместо ограничивающей разрядную камеру сетки, и пуллера с диаметром отверстия 6 мм, который находился на расстоянии 3 мм от плазменного электрода. Полный ток ионного пучка регистрировался цилиндром Фарадея. При оптимальных условиях эксперимента были сняты зависимости тока ионного пучка от напряжения экстракции. Эти зависимости представлены на рис. 4. В ходе экспериментов при напряжении экстракции на уровне 35 кВ были получены рекордные значения плотности ионного тока свыше $1,5 \text{ А/см}^2$.

Заключение

В рамках представленной работы для создания широкоапертурных потоков плазмы предложен источник на основе ЭЦР-разряда в магнитном поле одиночного соленоида. Экспериментально продемонстрировано, что в данной системе возможно получение квазиоднородного по поперечному сечению потока плазмы с плотностью на уровне 750 mA/cm^2 . При этом полный ток составлял 5 А. Проведены первые эксперименты по экстракции ионов, в ходе которых были достигнуты значения плотности тока ионного пучка свыше $1,5 \text{ A/cm}^2$. Приведенные данные свидетельствуют о перспективности такой схемы для получения широкоапертурных потоков плазмы в интересах создания сильноточных источников ионов для систем нейтральной инжекции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-90079.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brown I. G. The Physics and Technology of Ion Sources. – John Wiley & Sons, Inc., 1989.
2. Shikhvotsev I. V., Davydenko V. I., Ivanov A. A., Kotelnikov I. A., Kuzmin E. I., Kreter A., Mishagin V. V., Selivanov A. N., Selivanov P. A., Voskoboynikov R. V., Unterberg B., Karelin V. A., Bambutsa E. E. // AIP Conf. Proc. 2016. Vol. 1771. P. 070006.
3. Головановский К. С., Дугар-Жабон В. Д. // Приборы и техника эксперимента. 1991. Т. 4. С. 8.
4. Geller R. Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas. – Institute of Physics. Bristol. 1996.
5. Skalyga V., Zorin V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Bohanov A. // Plasma Sources Sci. Technol. 2006. Vol. 15. P. 727.
6. Golubev S., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Skalyga V., Vodopyanov A., Zorin V., Bokhanov A. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. 2007. Vol. 256. P. 537.
7. Mirnov V. V., Ryutov D. D. // Sov. Tekh. Phys. Lett. 1979. Vol. 5. P. 279.
8. Ryutov D. D. // Sov Phys Uspekhi. 1988. Vol. 31. № 4. P. 300.
9. Skalyga V., Izotov I., Razin S., Sidorov A., Golubev S., Kalvas T., Koivisto H., Tarvainen O. // Rev. Sci. Instrum. 2014. Vol. 85. P. 02A702.
10. Skalyga V., Izotov I., Golubev S., Sidorov A., Razin S., Vodopyanov A., Tarvainen O., Koivisto H., Kalvas T. // Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. P. 02A716.
11. Skalyga V. A., Izotov I. V., Sidorov A. V., Golubev S. V., Razin S. V. // Rev. Sci. Instrum. 2017. Vol. 88. P. 033503.
12. Ochkin V. N. Spectroscopy of Low Temperature Plasma. – Wiley-VCH, 2009.
13. Griem H. R. Spectral Line Broadening by Plasma. – New York: Academic Press, 1974.

PACS: 52.50.Dg

ECR discharge sustained by millimeter waves as a source of dense plasma flux

S. V. Golubev, V. A. Skalyga, I. V. Izotov, R. A. Shaposhnikov, S. V. Razin, A. V. Sidorov, A. F. Bokhanov, M. Yu. Kazakov, R. L. Lapin, and S. P. Shlepnev

Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS)
46 Ulyanova st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: shaposhnikov-roma@mail.ru

Received July 02, 2021

The results of the investigation of the dense ECR discharge hydrogen plasma flux formation in the single solenoid magnetic field are presented in this work. The transversal flux profile obtained at the optimal system parameters is shown. The possibility of the formation of homogeneous plasma fluxes with density of 750 mA/cm^2 and total current of 5 A is demonstrated. The results of the first experiments of the hydrogen ion beam extraction from the ECR discharge plasma in the single magnetic coil are presented. The record values of the ion current

density higher than 1.5 A/cm^2 were obtained. The results of the research presented in this paper show the prospects of the proposed system for applications of the neutral beam injector development for the plasma heating in the controlled thermonuclear fusion installations.

Keywords: ion source, ECR discharge, plasma fluxes.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-12-18

REFERENCES

1. I. G. Brown, *The Physics and Technology of Ion Sources* (John Wiley & Sons, Inc., 1989).
2. I. V. Shikhvotsev, V. I. Davydenko, A. A. Ivanov, I. A. Kotelnikov, E. I. Kuzmin, A. Kreter, V. V. Mishagin, A. N. Selivanov, P. A. Selivanov, R. V. Voskoboynikov, B. Unterberg, V. A. Karelin, and E. E. Bambutsa AIP Conf. Proc. **1771**, 070006 (2016).
3. K. S. Golovanivskij and V. D. Dugar-Zhabon, *Pribory i Tekhnika Eksperimenta* **4**, 8 (1991).
4. R. Geller, *Electron cyclotron resonance ion sources and ECR plasmas* (Institute of Physics, Bristol, 1996).
5. V. Skalyga, V. Zorin, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, and A. Bohanov, *Plasma Sources Sci. Technol.* **15**, 727 (2006).
6. S. Golubev, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, V. Skalyga, A. Vodopyanov, V. Zorin, and A. Bokhanov, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B* **256**, 537 (2007).
7. V. V. Mirnov and D. D. Ryutov *Sov. Tekh. Phys. Lett.* **5**, 279 (1979).
8. D. D. Ryutov, *Sov Phys Uspekhi* **31** (4), 300 (1988).
9. V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, S. Golubev, T. Kalvas, H. Koivisto, and O. Tarvainen *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 02A702 (2014).
10. V. Skalyga, I. Izotov, S. Golubev, A. Sidorov, S. Razin, A. Vodopyanov, O. Tarvainen, H. Koivisto, and T. Kalvas *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 02A716 (2016).
11. V. A. Skalyga, I. V. Izotov, A. V. Sidorov, S. V. Golubev, and S. V. Razin *Rev. Sci. Instrum.* **88**, 033503 (2017).
12. V. N. Oehkin, *Spectroscopy of Low Temperature Plasma* (Wiley-VCH, 2009).
13. H. R. Griem, *Spectral Line Broadening by Plasma* (Academic Press, New York, 1974).