

Влияние внешней электрической цепи на параметры плазмы в канале высокочастотного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов

Г. В. Швыдкий, И. И. Задириев, Е. А. Кралькина, К. В. Вавилин

Экспериментально исследовано аксиальное распределение потенциала плазмы, концентрации и температуры электронов в ВЧ емкостном источнике плазмы, имеющем геометрию ускорителя с замкнутым дрейфом электронов. Рассмотрены два случая организации внешней электрической цепи разряда. В первом случае электроды замыкались по постоянному току, во втором – размыкались. Показано, что замыкание электродов по постоянному току приводит к существенному росту потенциала плазмы и концентрации электронов. Вблизи электродов в ряде случаев наблюдаются локальные максимумы температуры и плотности плазмы, которые могут быть связаны с возникновением азимутального дрейфа электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Ключевые слова: высокочастотный разряд, холловский источник ионов, ускоритель с замкнутым дрейфом электронов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-1-24-30

Введение

Ускоритель с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП) с рабочим процессом, основанным на разряде постоянного тока, хорошо известен в научной литературе [1]. На базе УЗДП разработаны семейства электрических ракетных двигателей, носящих имя стационарного плазменного или Холловского двигателя [1–6]. В настоящее время стационарный плазменный

двигатель (СПД) является одним из лучших двигателей своего класса [1–4]. Его неоспоримыми преимуществами являются простота конструкции и надежность работы.

Параллельно с активной летной эксплуатацией СПД во многих лабораториях мира ведутся работы по усовершенствованию конструкции известных моделей двигателей, а также по исследованию возможностей использования комбинации разряда постоянного тока и модификаций ВЧ-разряда в качестве оптимизированного рабочего процесса. Так, в работе [7] рассмотрена возможность использования индуктивного ВЧ-разряда, а в работе [8] геликонного разряда для дополнительной ионизации рабочего газа в двухкамерной модели СПД.

Основываясь на аналогии между разрядом постоянного тока и емкостным ВЧ-разрядом, в работах [9–12] было предложено организовать рабочий процесс в УЗДП только на основе ВЧ-разряда. В такой схеме ВЧ-напряжение прикладывается между электродами, геометрически расположенными на месте анода и катода модели УЗДП, работающей на разряде постоянного тока. Известно, что в ем-

Швыдкий Георгий Вячеславович¹, аспирант.

E-mail: laggige@mail.ru

Задириев Илья Игоревич², инженер, к.ф.-м.н.

Кралькина Елена Александровна², в.н.с., д.ф.-м.н.

Вавилин Константин Викторович², вед. инженер, к.ф.-м.н.

¹ Институт общей физики имени А. М. Прохорова

Российской академии наук.

Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.

² Московский государственный университет

им. М. В. Ломоносова.

Россия, 111991, г. Москва, Ленинские горы, 1.

Статья поступила в редакцию 01 февраля 2021 г.

© Швыдкий Г. В., Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., 2021

костном ВЧ-разряде рядом с электродами формируются слои пространственного заряда, в которых наблюдается квазистационарное падение потенциала, ускоряющее ионы в направлении электродов. Естественно предположить, что в области падения потенциала при наличии радиального магнитного поля достаточной для замагничивания электронов величины возможно возникновение их азимутального дрейфа так же, как это происходит в разряде постоянного тока. Ионы же, не будучи замагниченными, под действием квазистационарного электрического поля должны ускоряться в направлении из канала.

Математическое моделирование емкостного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей, а также экспериментальные результаты, полученные в [9–14], подтвердили перспективность подхода. Так, в работе [14] были исследованы влияние величины магнитного поля, типа рабочего газа и

схемы организации разряда на энергию ионов. В частности, использование схемы емкостного ВЧ-разряда с электродами, замкнутыми по постоянному току, позволило увеличить энергию ионов с 70 до 340 эВ. Настоящая работа, являющаяся естественным продолжением работ [9–14], посвящена изучению аксиального распределения концентрации плазмы и потенциала плазмы в канале ВЧ УЗДП.

Схема установки и методика измерений

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1. Эксперименты проводились с использованием вакуумной камеры объемом 0,5 м³. Камера откачивалась до давления не хуже 1×10^{-5} Торр с помощью системы насосов: форвакуумного насоса DRP-1300 и турбомолекулярного КУКУ FF-250/2000E. Контроль давления осуществлялся с помощью широкодиапазонной лампы.

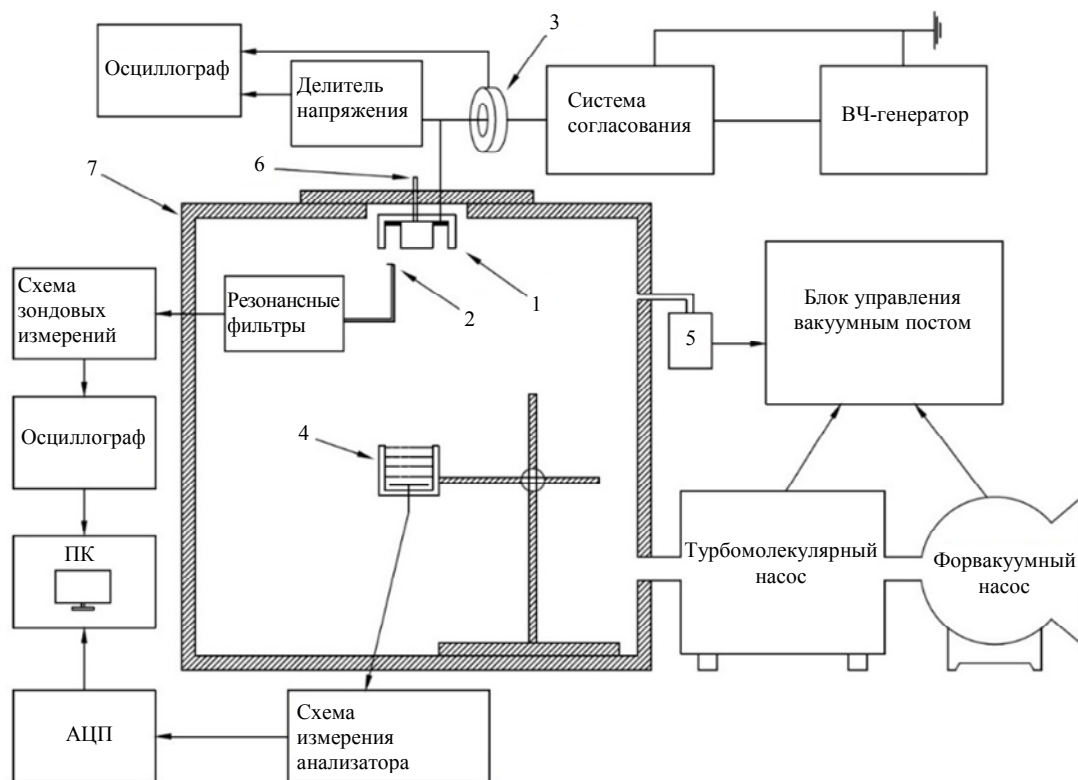


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – ВЧ УЗДП; 2 – зонд Ленгмюра; 3 – пояс Роговского; 4 – четырехсеточный энергоанализатор; 5 – широкодиапазонный датчик давления; 6 – газопровод; 7 – вакуумная камера.

Лабораторная модель ВЧ УЗДП была создана на основе модели СПД-70. Она состоит из диэлектрического керамического разрядно-

го канала, газораспределителя и электрода, размещенных на торцевой поверхности канала, а также заземленного кожуха. Радиус внут-

ренной стенки керамического разрядного канала составляет 2,5 см, внешней – 3,5 см, а его глубина 3,5 см. Накальный катод в экспериментах не использовался. Магнитное поле создавалось с помощью системы электромагнитов и магнитопроводов. Геометрия катушек и магнитопроводов не перетерпела значительных изменений, поэтому профиль радиальной компоненты магнитного поля вдоль разрядного канала близок к профилю, характерному для СПД-70. Максимум радиальной составляющей магнитного поля лежит вблизи среза канала. По мере удаления от среза как в глубь канала, так и за его пределы магнитное поле быстро спадает. В отличие от СПД, где магнитные катушки включены в цепь последовательно с разрядом, в настоящем эксперименте для пропускания тока через магнитную систему лабораторного источника ионов использовался внешний источник питания, позволявший регулировать величину тока в диапазоне от 0 до 5 А, что соответствует диапазону изменения радиальной составляющей магнитного поля B в области среза в диапазоне 0–350 Гс. Настоящий эксперимент проводился при значении $B = 120$ Гс. В качестве плазмообразующего газа использовался криптон.

Модель ВЧ УЗДП размещалась на фланце и устанавливалась в верхней части вакуумной камеры так, как это показано на рисунке 1. ВЧ-напряжение подавалось между активным электродом, размещенным внутри канала, и заземленным металлическим корпусом. В работе использовался ВЧ-генератор Cesar с рабочей частотой 13,56 МГц. Для оптимизации вложения ВЧ-мощности в плазму использовалась система согласования, состоящая из двух переменных емкостей и индуктивности [14].

Для поджига и поддержания ВЧ емкостного разряда использовались две электрические схемы. В первом случае во внешнюю цепь ВЧ-генератора была включена разделительная емкость. Во втором случае между электродами был включен дроссель с индуктивностью 150 мкГн. Таким образом, в первом случае разряд был разомкнут по постоянному току, во втором – замкнут. Соответствующие схемы организации разряда приведены в работе [14].

Для определения параметров плазмы на оси канала ВЧ УЗДП использовался цилиндрический зонд Ленгмюра длиной 4 мм и

радиусом 0,2 мм. Перемещение зонда осуществлялось с помощью шарнирно-винтовой передачи, расположенной в объеме вакуумной камеры вне источника плазмы. Управление перемещением зонда осуществлялось с помощью микроконтроллера. Измерения проводились как в канале, так и в струе плазмы на выходе из ВЧ УЗДП.

Для измерения ВАХ на зонд подавалось медленно меняющееся напряжение. ВЧ-компенсация зонда достигалась включением в зондовую цепь резонансных LC фильтров-пробок, придававших цепи высокий импеданс на частотах 13,56 и 27 МГц. Зондовые ВАХ регистрировалось с помощью двухканального цифрового осциллографа с функцией записи. Один канал осциллографа через делитель получал зондовое напряжение, на другой канал поступало напряжение с сопротивления 130 Ом, пропорциональное зондовому току. Из полученных таким образом данных с помощью ПК строились графики зондовых ВАХ, дальнейшая обработка которых с целью нахождения параметров плазмы осуществлялась с использованием стандартной методики.

По причине присутствия магнитного поля в разрядном канале, необходимо учесть его возможное влияние на зондовые измерения. В условиях экспериментов максимальная величина магнитной индукции в области среза канала (где магнитное поле достигает своего наибольшего значения) составляла 120 Гс. Оценки показывают, что Ларморовский радиус электронов с энергией более 1 эВ превышает 0,3 мм. В то же время радиус Дебая для концентраций электронов, лежащих в диапазоне 10^{10} – 10^{11} см⁻³, не превышает 0,02 мм. В работе [15] было показано, что в таком случае влиянием магнитного поля можно пренебречь.

Результаты измерений

На рисунках 2–4 показаны аксиальные распределения плазменного потенциала пространства, концентрации и температуры электронов, измеренные в ВЧ УЗДП при использовании двух схем организации емкостного ВЧ-разряда.

Рисунок 2 показывает, что при использовании двух схем организации разряда по-

тенциал пространства слабо меняется в объеме плазмы, резко падает за срезом канала, а затем плавно уменьшается при приближении к заземленным участкам (в частности, стенкам вакуумной камеры). Разница в свойствах разрядов, организованных с использованием замыкания и размыкания электродов по постоянному току, проявляет себя в величинах потенциала плазмы в канале относительно заземленного электрода. В случае, когда активный электрод разомкнут по постоянному току, средний потенциал плазмы в канале достигает величины 70 эВ, а при замыкании – 270 эВ. Известно [16, 17], что в емкостном ВЧ-разряде рядом с электродами возникают квазистационарные скачки потенциала. В случае разомкнутой по постоянному току разрядной цепи в асимметричном разряде, когда электроды обладают разной площадью, падение потенциала сосредоточено в основном у электрода меньшей площади, который приобретает отрицательное смещение относительно земли (эффект самосмещения) [16, 17]. Площадь заземленного корпуса источника плазмы существенно превышает площадь электрода (анода), находящегося в канале, что, в свою очередь, приводит к малой величине скачка потенциала у заземленного электрода. Учитывая тот факт, что потенциал плазмы относительно земли определяется именно величиной скачка потенциала около заземленного электрода, малость экспериментально полученных величин потенциала плазмы (70 эВ) при такой схеме организации разряда не вызывает удивления. Существенное увеличение потенциала плазмы в канале возможно при использовании второй схемы организации разряда с замыканием электродов по постоянному току [16, 17]. В этом случае эффект самосмещения исчезает. Между электродами начинает течь постоянный ток. Во время колебаний ВЧ-напряжения плазма приходит в соприкосновение только с одним электродом, а часть положительного пространственного заряда у другого электрода оказывается не скомпенсированной в течение всего ВЧ-периода колебаний. Это ведёт к тому, что падение потенциала у электрода большей площади повышается, что находит своё подтверждение в настоящем эксперименте. Наличие градиента потенциала в области среза канала сопровождается ускорением ионов. В работе [13] при условиях, близких к рас-

смотренным в настоящей работе, были зафиксированы потоки ионов со средними энергиями в 70 и 280 эВ соответственно. Указанные значения близки к величинам потенциала плазмы в канале ВЧ УЗДП, показанным на рисунке 2.

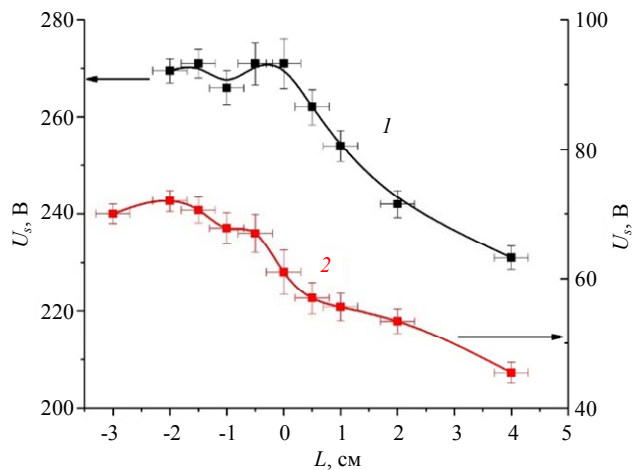


Рис. 2. Аксиальное распределение потенциала плазмы в канале ВЧ УЗДП при условии, что электроды замкнуты (черная кривая 1, левая ось ординат) и разомкнуты (красная кривая 2, правая ось ординат) по постоянному току. Мощность ВЧ-генератора 150 Вт. Индукция магнитного поля 120 Гс. Расход криптона 25 см³/мин. «Ноль» оси абсцисс соответствует срезу канала. Отрицательные значения – расстояние вглубь канала, положительные – за пределами канала.

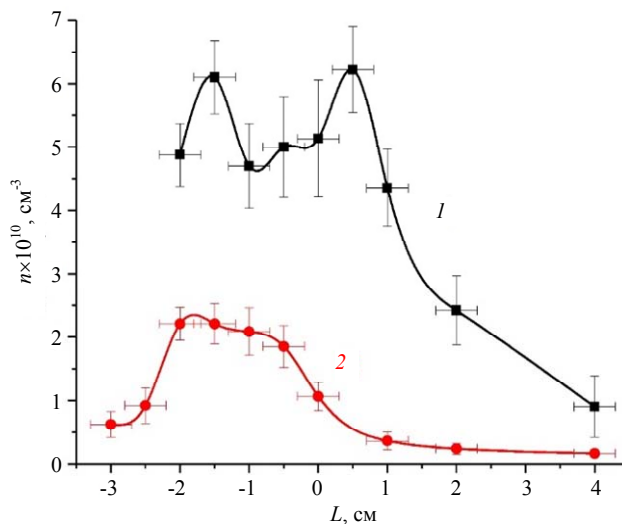


Рис. 3. Аксиальное распределение плотности плазмы в канале ВЧ УЗДП при условии, что электроды замкнуты (черная кривая 1) и разомкнуты (красная кривая 2) по постоянному току. Мощность ВЧ-генератора 150 Вт. Индукция магнитного поля 120 Гс. Расход криптона 25 см³/мин. «Ноль» оси абсцисс соответствует срезу канала. Отрицательные значения – расстояние вглубь канала, положительные – за пределами канала.

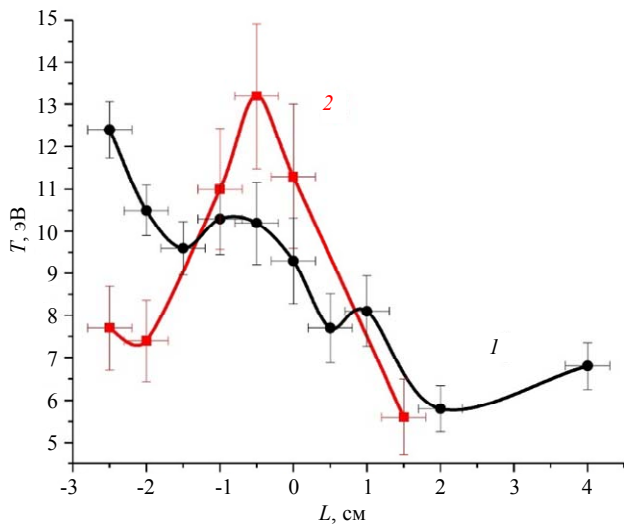


Рис. 4. Аксиальное распределение температуры электронов в канале ВЧ УЗДП при условии, что электроды замкнуты (красная кривая 2) и разомкнуты (черная кривая 1) по постоянному току. Мощность ВЧ-генератора 150 Вт. Индукция магнитного поля 120 Гс. Расход криптона 25 см³/мин. «Ноль» оси абсцисс соответствует срезу канала. Отрицательные значения – расстояние вглубь канала, положительные – за пределами канала.

Эксперименты показали, что концентрация электронов, измеренная в схеме с разомкнутыми по постоянному току электродами, существенно ниже, чем при использовании схемы с замкнутыми электродами (см. рис. 3). Если электроды замкнуты по постоянному току, то в канале наблюдаются два максимума электронной плотности. Локальные максимумы плотности могут быть вызваны по крайней мере двумя причинами, а именно ускорением электронов в приэлектродных слоях пространственного заряда, а также повышением частоты ионизации в областях разряда, где присутствует азимутальный дрейф электронов. В случае разомкнутого по постоянному току разряда температура электронов велика у активного электрода, где происходит основное падение потенциала, а локальный максимум по температуре вблизи среза канала существенно ниже (см. рис. 4). Обратная картина наблюдается при условии, что электроды замкнуты по постоянному току. Здесь локальный максимум электронной температуры у среза канала выше. За срезом канала, в области струи плазмы, концентрация и температура электронов падают по мере удаления от канала в обоих рассмотренных случаях.

Заключение

В работе выполнено измерение аксиального распределения потенциала плазмы, концентрации и температуры электронов в модели ВЧ УЗДП при использовании внешней цепи, обеспечивающей размыкание и замыкание электродов по постоянному току. Эксперименты показали, что при использовании схемы разряда с замыканием электродов по постоянному току наблюдаются более высокие значения потенциала плазмы и концентрации электронов. Значительный скачок потенциала у электрода большей площади возникает вследствие того, что во время колебаний ВЧ-напряжения плазма приходит в соприкосновение только с одним электродом меньшей площади. При этом часть положительного пространственного заряда оказывается не скомпенсированной. Локальные максимумы концентрации и температуры электронов наблюдаются в областях приэлектродных скачков потенциала, где скрещенные электрическое и магнитное поля могут вызывать азимутальный дрейф электронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кум В. П. // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45.
2. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. – California: Wiley, 2008.
3. Горшков О. А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 2008.
4. Mazouffre S. // Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 033002.
5. Boeuf Jean-Pierre. // Journal of Applied Physics. 2017. Vol. 121. P. 011101.
6. Kaganovich I. D., Smolyakov A., Raitses Y., Aheido E., Mikellides I. G., Jorns B., Taccogna F., Cueroult R., Tsikata S., Bourdon A., Boeuf J., Keidar M., Powis A. T., Merino M., Hara K., Carlsson J. A., Fisch N. J., Chabert P., Schweigert I., Lafleur T., Matyash K., Khrabrov A. V., Boswell R. W., Fruchtman A. // Phys. Plasmas. 2020. Vol. 27. P. 120601.
7. Бугрова А. И., Бугров Г. Э., Харчевников В. К., Шапошиников М. И., Mazouffre S. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 7. С. 89.
8. Levchenko I., Xu S., Mazouffre S., Lev D., Pedrini D., Goebel D., Garrigues L., Taccogna F., Bazaka K. // Phys. Plasmas. 2020. Vol. 27. P. 020601.
9. Задириев И. И. Использование емкостного высокочастотного разряда низкого давления в радиальном магнитном поле для получения ускоренного потока ионов: дис. ... к-та физ.-мат. наук: 01.04.08. – М., 2017.

10. Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Павлов В. Б., Вавилин К. В., Тараканов В. П. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 11. С. 1.
11. Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Швыдкий Г. В., Александров А. Ф. // Прикладная физика. 2018. № 2. С. 10.
12. Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Швыдкий Г. В., Александров А. Ф. // Прикладная физика. 2018. № 3. С. 5.
13. Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Тараканов В. П., Швыдкий Г. В., Александров А. Ф. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 33.
14. Shvydkiy G. V., Zadiriev I. I., Kralkina E. A., Vavilin K. V. // Vacuum. 2020. Vol. 180. P. 1.
15. Серёда И. Н., Целуйко А. Ф. Зондовые методы диагностики плазмы. – Харьков, ХНУ имени В. Н. Каразина, 2015.
16. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. – М.: изд. МФТИ: Наука Физматлит, 1995.
17. Савинов В. П. Физика высокочастотного емкостного разряда. – М.: Физматлит, 2013.

PACS: 52.75.Di, 52.80.Pi

Influence of an external circuit on the plasma parameters in the channel of the radio-frequency accelerator with a closed electron drift

G. V. Shvydky¹, I. I. Zadiriev², E. A. Kralkina², and K. V. Vavilin²

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia

² Moscow State University M. V. Lomonosov
1 Leninskie gory, Moscow, 111991, Russia

Received February 01, 2021

The axial distribution of the plasma potential, concentration and temperature of electrons in an RF capacitive plasma source with the geometry of an accelerator with a closed electron drift is experimentally investigated in this work. Two cases of the external electrical discharge circuit are considered. In the first case, the electrodes were closed by direct current, in the second, they were opened. It is shown that direct current closure of the electrodes leads to a significant increase in the plasma potential and electron concentration. In a number of cases, local maxima of temperature and plasma density are observed near the electrodes, which can be associated with the occurrence of azimuthal electron drift in crossed electric and magnetic fields.

Keywords: high-frequency discharge, Hall ion source, accelerator with closed electron drift.

REFERENCES

1. V. P. Kim, Journal of Technical Physics **85** (3), 45 (2015).
2. D. M. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (Wiley, California, 2008).
3. O. A. Gorshkov, V. A. Muravlev, A. A. Shagayda, A. S. Koroteev (Ed.), *Hall and Ion Plasma Thrusters for Spacecraft*. (Mashinostroyenie, Moscow, 2008) [in Russian].
4. S. Mazouffre, Plasma Sources Sci. Technol. **25**, 033002 (2016).
5. Jean-Pierre Boeuf, Journal of Applied Physics **121**, 011101 (2017).
6. I. D. Kaganovich, A. Smolyakov, Y. Raitses, E. Ahedo, I. G. Mikellides, B. Jorns, F. Taccogna, R. Cueroult, S. Tsikata, A. Bourdon, J. Boeuf, M. Keidar, A. T. Powis, M. Merino, K. Hara, J. A. Carlsson, N. J. Fisch, P. Chabert, I. Schweigert, T. Lafleur, K. Matyash, A. V. Khrabrov, R. W. Boswell, and A. Fruchtman, Phys. Plasmas **27**, 120601 (2020).
7. A. I. Burgova, G. E. Burgov, V. K. Kharchevnikov, M. I. Shaposhnikov, and S. Mazouffre, JETP Letters **38** (7), 89 (2012).

8. I. Levchenko, S. Xu, S. Mazouffre, D. Lev, D. Pedrini, D. Goebel, L. Garrigues, F. Taccogna, and K. Bazaka. *Phys. Plasmas* **27**, 020601 (2020).
9. I. I. Zadiriev, *Using of a low-pressure capacitive RF discharge in a radial magnetic field for creation of an accelerated ion flow*. PhD dissertation (Prokhorov General Physics Institute, Moscow, 2017) [in Russian].
10. I. I. Zadiriev, A. A. Rukhadze, E. A. Kralkina, V. B. Pavlov, K. V. Vavilin, and V. P. Tarakanov, *Tech. Phys.* **86** (11), 1 (2016).
11. I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, G. V. Shvidkiy, and A. F. Aleksandrov, *Applied Physics*, No. 2, 10 (2018) [in Russian].
12. I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, G. V. Shvidkiy, and A. F. Aleksandrov, *Applied Physics*, No. 3, 5 (2018) [in Russian].
13. I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, V. P. Tarakanov, G. V. Shvidkiy, and A. F. Aleksandrov, *Applied Physics*, No. 5, 33 (2018) [in Russian].
14. G. V. Shvydkiy, I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, and K. V. Vavilin, *Vacuum* **180**, 1 (2020).
15. I. N. Sereda and A. F. Celuyko. *Probe methods for plasma diagnostics* (Kharkiv, KhNU named after V. N. Karazin, 2015) [in Russian].
16. Y. P. Raizer, M. N. Shneider, and N. A. Yatsenko, *Radio-Frequency Capacitive Discharges* (Nauka Fizmatlit, Moscow, 1995).
17. V. P. Savinov, *Physics of Radiofrequency Capacitive Discharge* (Nauka Fizmatlit, Moscow, 2013).