

УДК 537.525
EDN: ZDWDOG

PACS: 52.75.Di



Характеристики сеточного ВЧ источника ионов с металлической газоразрядной камерой

И. И. Задириев, Е. А. Кралькина, К. В. Вавилин, А. М. Никонов,
Г. В. Швыдкий, С. Ю. Маринин, Д. А. Бондаренко, А. А. Ходов

Выполнено экспериментальное исследование параметров сеточного ВЧ источника ионов с металлической газоразрядной камерой диаметром 10 см и внутренней антенной. Продемонстрирована стабильность работы указанного источника в случае, когда в цепь ВЧ-антенны последовательно включены 2 ёмкости, размыкающие эту цепь по постоянному току. Показано, что в зависимости извлечённого ионного тока от индукции внешнего продольного магнитного поля наблюдается максимум при значении 16 Гс. Извлечённый ионный ток у исследованного источника приблизительно в 2 раза меньше, чем у аналогичного источника с кварцевой ГРК такого же диаметра и внешней ВЧ-антенной.

Ключевые слова: источник ионов, индуктивный высокочастотный разряд, сеточный.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-1-19-24

Введение

Сеточные источники ионов находят широкое применение во многих промышленных

технологиях, связанных с ионно-пучковым распылением и поверхностной модификацией материалов. Помимо этого подобные устройства используются на космических аппаратах для получения тяги, где их принято называть ионными двигателями. Подробное описание устройства и принципов действия ионных двигателей можно найти в работах [1–3]. Особый интерес для космической отрасли представляют ионные двигатели, основанные на высокочастотном (ВЧ) индуктивном разряде, так как позволяют работать на химически активных газах или с их примесями [1]. Современные ВЧ ионные двигатели имеют диэлектрическую газоразрядную камеру (ГРК), на внешней поверхности которой расположена ВЧ антенна-индуктор. Геометрия, размеры и материал ГРК оказывают существенное влияние на такой важнейший параметр эффективности ионного двигателя, как энергетическая цена иона. Конструкция ионных двигателей с керамической ГРК и внешней антенной является наиболее подходящей для повышения эффективности ВЧ индуктивного разряда как рабочего процесса за счёт минимизации потерь, вызванных ёмкостной компонентой разряда (связанной с межвитковыми ёмкостями

Задириев Илья Игоревич^{1,2}, вед. инженер, к.ф.-м.н.

E-mail: iizadiriev@yandex.ru

Кралькина Елена Александровна¹, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: ekralkina@mail.ru

Вавилин Константин Викторович¹, вед. инженер, к.ф.-м.н.

E-mail: viline@inbox.ru

Никонов Александр Михайлович^{1,2}, м.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: nikonov.207@mail.ru

Швыдкий Георгий Вячеславович^{1,2}, м.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: laggige@mail.ru

Маринин Сергей Юрьевич², нач. сектора.

Бондаренко Дмитрий Алексеевич², инженер 2 кат.

E-mail: bondarenko040896@yandex.ru

Ходов Александр Андреевич², инженер.

E-mail: sashakhodov@mail.ru

¹ МГУ им. М. В. Ломоносова.

Россия, 111991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

² АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Россия, 107078, Москва, Хоромный тупик, 4, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 25.09.2023

После доработки 18.10.2023

Принята к публикации 31.10.2023

Шифр научной специальности: 1.3.9.

© Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В.,
Никонов А. М., Швыдкий Г. В., 2024

индуктора). Однако при масштабировании ионных двигателей в сторону больших мощностей и больших токов пучка проявляются серьёзные трудности в создании соответствующих керамических ГРК большого диаметра (50 см и более), обусловленные дороговизной и хрупкостью керамических материалов. Для подобных ионных двигателей большого диаметра целесообразно рассмотреть возможность функционирования с металлической ГРК.

Переход на ГРК с проводящими стенками требует решения ряда технических проблем. Во-первых, стенки ГРК будут находиться под высоким напряжением первого (экранирующего) электрода ионно-оптической системы (ИОС) даже в том случае, если между электродом и стенками находится керамический изолятор, так как в ходе работы будет присутствовать контакт через разрядную плазму. Во-вторых, требуется организовать ввод ВЧ-мощности в разрядную плазму. Можно сохранить внешнюю антенну, но это потребует размещения в стенках ГРК диэлектрических «вставок», не позволяющих протекать индуцированным в материале ГРК азимутальным ВЧ-токам. Такая конструкция является сложной и подвержена запылению «вставок» проводящим материалом, что сделает работу устройства невозможной. Альтернативно можно перейти к внутренней антенне. В этом случае требуется изоляция антенны от высокого потенциала разрядной плазмы. Помимо описанных технических проблем требуют исследования особенности функционирования ионных двигателей с металлической ГРК.

Сама тематика сеточных ВЧ источников ионов с металлической ГРК не нова. В частности, в работах [4, 5] был рассмотрен подобный источник ионов для целей обработки поверхностей. В качестве ионных двигателей ВЧ источники ионов с металлической ГРК обычно не рассматриваются, так как уступают по энергетической цене иона аналогичным устройствам с диэлектрической ГРК, а в космической отрасли требования к эффективности двигателей достаточно строги. Однако при увеличении диаметра (и мощности) ионного двигателя влияние многих негативных факторов, обуславливающих низкую эффективность устройств с металлической ГРК, должно ослабевать. К таким факторам относится меньшее

вложение мощности в плазму (за счёт меньшего диаметра и длины внутренней антенны по сравнению с внешней при неизменном диаметре ГРК), потери за счёт наведённых в стенках ГРК вихревых токов и потери за счёт увеличенной ёмкостной компоненты разряда. При этом с увеличением диаметра ГРК выгода в массе и надёжности от использования металлических стенок растёт.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования параметров лабораторного ВЧ источника ионов с металлическими стенками ГРК и выполнено сравнение с близким по размерам источником с кварцевой ГРК.

Схема эксперимента

Как было упомянуто выше, во вступлении, наибольший интерес представляют источники ионов с металлической ГРК больших диаметров (50 см и более). Однако проведение экспериментального исследования таких источников и сравнение их параметров с параметрами источников аналогичного размера с диэлектрической ГРК крайне затруднительно из-за дороговизны компонентов (ИОС и ГРК) и требований к вакуумному и электрическому оборудованию. По этой причине мы ограничиваемся рассмотрением источников с диаметром ГРК 10 см, делая упор на выявлении принципиальных особенностей функционирования ВЧ источника ионов с металлической ГРК.

Схема исследуемого лабораторного источника ионов изображена на рисунке 1. Цилиндрическая ГРК из немагнитной нержавеющей стали диаметром 10 см и длиной 10 см закреплялась на фланце вакуумной камеры через керамические изоляторы. Внутренняя спиральная антенна-индуктор диаметром 7,5 см и высотой 5 см имела 3,5 витка, была выполнена из медной трубки диаметром 3 мм (в ходе экспериментов охлаждалась водой) и вводилась через дно ГРК с использованием керамических колец. Расстояние от ИОС до ближайшего витка внутренней антенны составляло около 3 см, а от антенны до дна ГРК и разораспределителя – около 2 см. Лабораторный источник ионов был помещён в заземлённый металлический кожух, а между ГРК и

кожухом была проложена ткань из кремнезема во избежание пробоя. На внешней стороне кожуха был закреплён электромагнит, позволявший создавать слаборасходящееся продольное магнитное поле в ГРК с максимумом индукции в районе её центра. Использовалась пережатая ИОС из двух электродов с диаметрами отверстий в экранирующем и ускоряющем электродах в 2 и 1 мм соответственно. В электрическую цепь антенны-индуктора были последовательно включены две керамические ёмкости по 10 нФ для размыкания цепи по постоянному току – это предотвращало повреждение ВЧ источника питания и системы согласования из-за контакта антенны с высоким постоянным напряжением разрядной плазмы и защищало антенну от разрушения за счёт протекания постоянного тока между ней и стенками ГРК с экранирующим электродом ИОС.

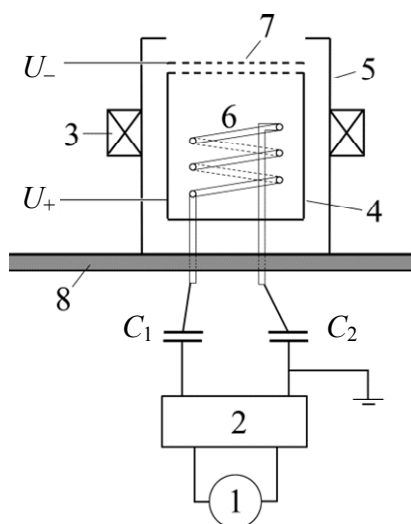


Рис. 1. Схема лабораторного источника ионов: 1 – ВЧ источник питания; 2 – система согласования; 3 – электромагнит; 4 – металлическая ГРК; 5 – кожух; 6 – ВЧ антенна-индуктор; 7 – двух-электродная ИОС; 8 – фланец вакуумной камеры. $C_1 = C_2 = 10$ нФ, $U_+ = 1100$ В, $U_- = -200$ В

В ходе измерений регистрировались следующие величины: ионный ток пучка с помощью встроенного в источник постоянного напряжения цифрового миллиамперметра (погрешность измерения ± 2 мА), подводимая к источнику ВЧ-мощность с помощью встроенного в ВЧ источник питания ваттметра (погрешность измерения ± 1 Вт) и расход рабочего газа, аргона, посредством шарикового натека-теля (ротаметра, погрешность измерения

0,5 мл/мин). Частота ВЧ-напряжения, подводимого к антенне-индуктору, составляла 13,56 МГц. Напряжение на экранирующем электроде ИОС относительно земли (кожуха и стенок вакуумной камеры) устанавливалось в 1100 В, на ускоряющем в -200 В. Откачка вакуумной камеры осуществлялась форвакуумным и турбомолекулярным насосами. Остаточное давление без подачи рабочего газа составляло 2×10^{-5} Торр, с подачей 12 мл/мин аргона во время работы ионного источника – 6×10^{-4} Торр. В настоящей работе исследовались характеристики лабораторного источника ионов при следующих внешних параметрах: ВЧ-мощность 100–200 Вт, расход аргона 4–20 мл/мин, индукция внешнего магнитного поля (в районе её максимума) 0–45 Гс.

Экспериментально полученные характеристики лабораторного источника сравнивались с полученными ранее на том же оборудовании характеристиками сеточного источника ионов с цилиндрической кварцевой ГРК и похожими размерами. Помимо материала ГРК второй источник имел следующие отличия: кварцевая ГРК имела высоту 7,5 см, спиральная антенна была помещена на внешнюю боковую сторону ГРК и имела 3,5 витка, в цепи антенны отсутствовали последовательно соединённые емкости для развязки по постоянному току, использовавшаяся ИОС имела три электрода (с той же прозрачностью и теми же диаметрами отверстий в первых двух электродах), использовался электромагнит большего диаметра, который был расположен в районе ИОС и позволял создавать магнитное поле с индукцией от 0 до 85 Гс.

Результаты и их обсуждение

При работе на частоте 13,56 МГц сильное влияние на извлекаемый из источника ионный ток оказывает величина внешнего продольного магнитного поля. Подробно этот эффект разобран в работе [6] и главным образом объясняется изменением доли ВЧ-мощности, вложенной в разрядную плазму, при возникновении условий, допускающих возбуждение в разрядной плазме волн с частотами, близкими к электронной циклотронной частоте (косых Ленгмюровских волн или волн Трайвелписа-Голда). На рисунке 2 показана

зависимость извлекаемого ионного тока от величины внешнего магнитного поля для двух лабораторных источников при одинаковых ВЧ-мощности и расходе рабочего газа. Далее для удобства будем называть источник с металлической ГРК источником-1, а с кварцевой – источником-2. На обеих кривых виден выраженный пик ионного тока, за которым следует его падение. Величина магнитного поля, при котором ионный ток достигает максимума, отличается для источника-1 и источника-2: 16 Гс против 26 Гс.

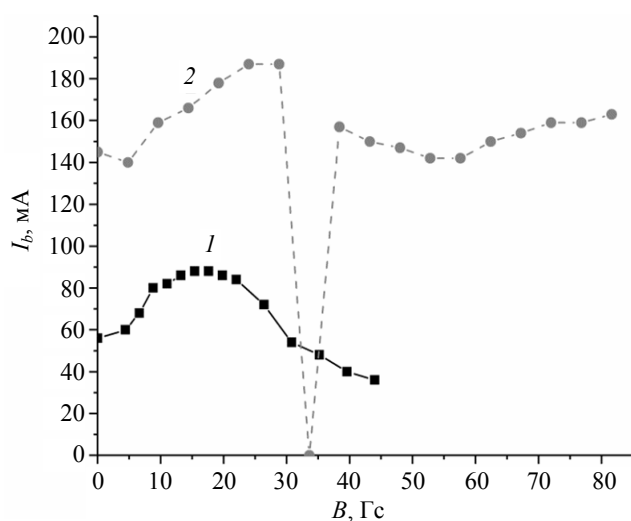


Рис. 2. Зависимость извлечённого ионного тока I_b от индукции магнитного поля B в центре электромагнита. Кривая 1 соответствует источнику-1, кривая 2 – источнику-2. ВЧ-мощность 140 Вт, расход аргона 12 мл/мин

Подобные отличия вполне ожидаемы, учитывая существенно отличающиеся размеры и расположения ВЧ-антенн, а также тот факт, что у источника с кварцевой ГРК магнит находился в районе ИОС, то есть магнитное поле в районе ГРК у него несколько ниже, чем то, что отмечено по оси абсцисс на рисунке 2. Отметим также следующее: в районе магнитных полей 34 Гс разряд в источнике-2 гас, в то время, как на аналогичной кривой для источника-1 падение ионного тока после максимума не сопровождалось гашением разряда. Также обращает на себя внимание значительная разница в извлекаемых ионных токах при одинаковых ВЧ-мощностях для двух рассмотренных источников. Лучше это иллюстрирует рисунок 3, на котором изображены зависимости извлечённого ионного тока от ВЧ-мощности при фиксированных расходе рабочего

газа и индукции внешнего магнитного поля. Видно, что в отсутствие внешнего магнитного поля источник-1 уступает источнику-2 в извлечённом ионном токе в 3 раза при одинаковых ВЧ-мощностях. Наложение оптимального (соответствующего максимуму ионного тока) внешнего магнитного поля приводит к тому, что извлечённый ток для двух источников отличается в 2 раза.

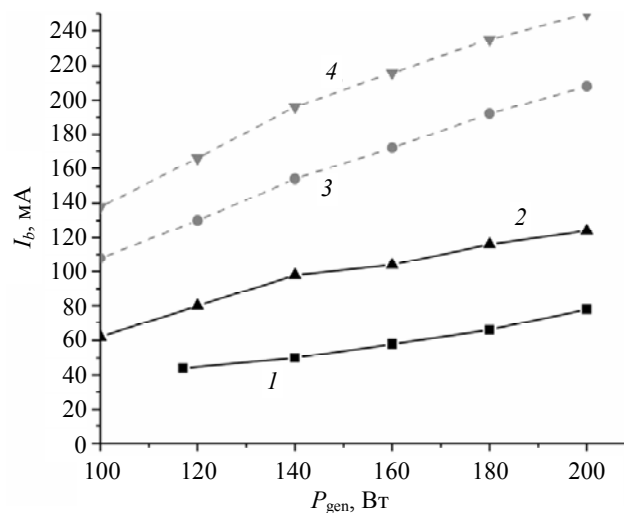


Рис. 3. Зависимость извлечённого ионного тока I_b от ВЧ-мощности P_{gen} подводимой к разряду. Расход аргона 12 мл/мин. Кривые 1, 2 соответствуют источнику-1, кривые 3, 4 – источнику-2. Кривые 1 и 3 сняты в отсутствие внешнего магнитного поля, кривые 2 и 4 с магнитным полем, оптимальным для извлечения ионов на соответствующем источнике ионов

Причины меньшей эффективности источника с металлической ГРК в общих чертах были перечислены во вступлении настоящей работы, однако в данном эксперименте к ним можно добавить ещё и меньший диаметр ВЧ-антенны и большую длину ГРК у источника-1 по сравнению с источником-2. Заметную разницу также показывают кривые постоянства (кривые постоянного извлекаемого ионного тока в координатах расход рабочего газа – ВЧ-мощность), изображённые на рисунке 4. Кривые иллюстрируют влияние расхода рабочего газа на параметры выбранного источника. У источника-2 резкий рост требуемой для извлечения фиксированного ионного тока ВЧ-мощности начинается с расходов около 7 мл/мин, в то время, как у источника-1 рост требуемой ВЧ-мощности с уменьшением расхода выражен слабо. Это указывает на то, что разница в эффективности двух источников

будет сокращаться по мере перехода к низким расходам рабочего газа.

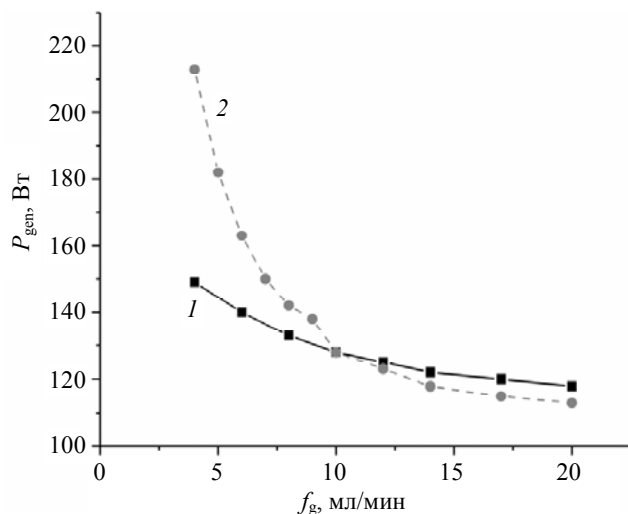


Рис. 4. Кривые постоянства. P_{gen} – подводимая к разряду ВЧ-мощность, f_g – расход аргона. 1 – источник-1 с извлекаемым током 80 мА и магнитным полем 18 Гс; 2 – источник-2 с извлекаемым током 170 мА и магнитным полем 26 Гс

Важно указать, что работа источника с металлической ГРК в исследованном диапазоне параметров была стабильной, пробои внутри ГРК или между ГРК и кожухом отсутствовали. Полученная разница в извлечённом ионном токе для источника-1 и источника-2 ярко иллюстрирует упомянутый во вступлении факт падения эффективности при переходе к металлической ГРК. Конструкция исследуемого лабораторного источника с металлической ГРК не является оптимизированной и может быть улучшена с точки зрения эффективности, однако это повлечёт за собой её усложнение. Одним из примеров такой оптимизации является покрытие внутренней антенны толстым слоем диэлектрического материала (или помещение её в диэлектрическую трубку). Подобная мера ослабит негативное влияние межвитковых емкостей на потери в разрядной плазме и позволит устранить из разрядной цепи последовательно включённые ёмкости, диссипирующие часть ВЧ-мощности. С другой стороны, на диэлектрическое покрытие антенны будет напыляться проводящий материал с электродов ИОС и стенок ГРК, по-

этому потребуются область диэлектрика сложной формы для недопущения замыкания вихревых токов в этом напылённом слое проводника, способных экранировать вихревое ВЧ поле антенны и привести к выходу источника ионов из строя.

Заключение

В работе экспериментально продемонстрировано функционирование сеточного ВЧ источника ионов с металлической ГРК диаметром 10 см и внутренней антенной. Выполнено сравнение параметров этого источника с параметрами аналогичного источника, имеющего кварцевую ГРК и внешнюю антенну.

Обнаружен максимум в зависимости извлеченного из источников ионного тока от индукции внешнего продольного магнитного поля, наложенного на разрядную плазму. Для источника с металлической ГРК максимум находится в районе 16 Гс, для источника с кварцевой ГРК – 26 Гс.

Показано, что извлекаемый из источника с металлической ГРК ионный ток в 2–3 раза ниже, чем из источника с кварцевой ГРК при одинаковых расходах рабочего газа и ВЧ-мощностях. Разница в ионном токе уменьшается по мере перехода к низким расходам рабочего газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. – Hoboken: Wiley, 2008.
2. Mazouffre S. / Plasma Sources Sci. Technol. 2016. Vol. 25. P. 033002. doi: 10.1088/0963-0252/25/3/033002
3. Горшков О. А., Муравлёв В. А., Шагайда А. А., Коротеев А. С. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 2008.
4. Freisinger J. et al. / Rev. Sci. Instrum. 1992. Vol. 63. P. 2441. doi: 10.1063/1.1142904
5. Bisten M. et al. / Proceedings of the 22th IEPC. – Viareggio, 1991. IEPC-1991-066.
6. Kralkina E. A. et al. / Vacuum. 2019. Vol. 167. P. 136. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.05.041

Characteristics of a gridded RF ion source with a metal gas-discharge chamber

*I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, A. M. Nikonov, G. V. Shvidkiy,
S. Y. Marinin, D. A. Bondarenko and A. A. Khodov*

¹Lomonosov Moscow State University
Bd. 2 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: iizadiriev@yandex.ru

²“VNIEM Corporation” JC
4/1 Khoromny tupik, Moscow, 107078, Russia

Received 25.09.2023; revised 18.10.2023; accepted 31.10.2023

An experimental study of the parameters of a gridded RF ion source with a metal gas-discharge chamber with a diameter of 10 cm and an internal antenna was carried out. The stability of the operation of the specified source has been demonstrated in the case when 2 capacitors are connected in series to the RF antenna circuit, opening this circuit by direct current. It is shown that in the dependence of the extracted ion current on the induction of the external longitudinal magnetic field, a maximum is observed in the region of 16 G. The extracted ion current from the studied ion source is approximately 2 times less than from a similar source with a quartz gas-discharge chamber of the same diameter and an external RF antenna.

Keywords: ion source, inductive RF discharge, gridded.

REFERENCES

1. Goebel D. M. and Katz I., *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, Hoboken, Wiley, 2008.
2. Mazouffre S., *Plasma Sources Sci. Technol.* **25**, 033002 (2016). doi: 10.1088/0963-0252/25/3/033002
3. Gorshkov O. A., Muraviev V. A., Shagayda A. A. and Koroteev A. S., *Hall and Ion Plasma Thrusters for Spacecraft*, Moscow, Mashinostroyeniye, 2008 [in Russian].
4. Freisinger J. et al., *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 2441 (1992). doi: 10.1063/1.1142904
5. Bisten M. et al., in *Proceedings of the 22th IEPC*, Viareggio, 1991, IEPC-1991-066.
6. Kralkina E. A. et al., *Vacuum* **167**, 136 (2019). doi: 10.1016/j.vacuum.2019.05.041