

УДК 537.525
EDN: MAKCLT

PACS: 52.75.Di



Импульсный ВЧ индуктивный разряд как эффективный рабочий процесс сеточного ВЧ источника ионов

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

Экспериментально рассмотрен импульсный ВЧ-разряд как рабочий процесс сеточного ВЧ ионного источника. Показано, что при работе на таком разряде может быть получен прирост ионного тока по сравнению с непрерывным режимом работы. Этот прирост тем больше, чем больше разница между характерным временем падения ионного тока после выключения ВЧ-мощности и временем нарастания ионного тока при включении ВЧ-мощности. Оценены параметры пульсаций, при которых достигается максимизация ионного тока. Показано, что внешнее постоянное продольное магнитное поле в диапазоне 0–7,2 мТ немонотонно влияет на максимальное и равновесное значение ионного тока в импульсе, при этом темпы падения ионного тока после выключения ВЧ-мощности не изменяются.

Ключевые слова: высокочастотный (ВЧ), разряд, плазма, импульсный, электроны, ионы.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-213-220

Введение

К настоящему времени накоплен значительный объём экспериментальных и теоретических материалов, описывающих физические процессы в сеточных ВЧ ионных источниках. Устройства такого типа широко востребованы в промышленности и, в зависимости от их применения, сводятся к набору хорошо изученных и оптимизированных с инженерной точки зрения решений. Однако развитие тех-

нологий расширяет диапазон параметров, требуемых от сеточных ВЧ ионных источников, и заставляет искать новые технические решения для их достижения. Особенно строгие требования к ним предъявляются в космической отрасли, где они используются для получения тяги как ВЧ ионные двигатели [1–4]. Так как в ионных двигателях получение тяги условно разделяется на две стадии: ионизация рабочего тела в газоразрядной камере (ГРК) и ускорение ионов в ионно-оптической системе (ИОС), увеличение параметров эффективности сводится к оптимизации ИОС и процессов ионизации в ГРК. Итоговые параметры эффективности двигателя ограничены ценой иона, определяющей эффективность процесса ионизации в ГРК и зависящей от многих величин, таких как род рабочего газа, размеры ГРК, рабочая частота и т. д. У двигателя RIT-10, имеющего диаметр ГРК в 10 см, этот параметр имеет величину ~350 Вт/А [1]. В качестве путей минимизации цены иона рассматриваются следующие подходы: оптимизация геометрии и материала ГРК [5–7], наложение внешнего

Задириев Илья Игоревич, вед. инженер, к.ф.-м.н.

E-mail: iizadiriev@yandex.ru

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

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

Никонов Александр Михайлович, инженер.

Швыдкий Георгий Вячеславович, м.н.с.

МГУ им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023

После доработки 17.04.2023

Принята к публикации 19.04.2023

© Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В.,
Никонов А. М., Швыдкий Г. В., 2023

постоянного магнитного поля на разряд [8], оптимизация параметров индуктора (в том числе использование ферритовых элементов около него) [9]. Нами исследуется новый подход, заключающийся в использовании импульсного разряда для достижения более низких значений цены иона.

Существует множество работ, посвящённых исследованию ВЧ индуктивного импульсного разряда, большинство из которых нацелено на улучшение параметров промышленных плазменных реакторов [10–23]. Применительно к ВЧ ионным двигателям импульсный разряд не получил широкого распространения. Он, очевидно, может использоваться для точной регулировки тяги двигателя или для получения отрицательно заряженных ионов в стадии деионизации при работе на электроотрицательных газах (хотя подобный метод получения отрицательных ионов не является эффективным) [24]. Наша идея увеличения эффективности ионного источника с помощью импульсного разряда подробно изложена в предыдущей работе [25] и заключается в использовании того факта, что после выключения ВЧ-мощности ионный ток продолжает выходить через ИОС, экспоненциально падая по величине со временем. Если этот ионный ток, получающийся без затрат ВЧ-мощности, превышает потери в ионном токе во время его выхода на равновесное значение при подаче ВЧ-мощности в начале импульса, то энергетическая эффективность устройства растёт.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования сеточного ВЧ ионного источника, работающего на импульсном разряде. Основное внимание уделено зависимостям ионного тока от времени в течение импульса и условиям, при которых достигается выигрыш в ионном токе по сравнению со стационарным режимом работы.

Схема эксперимента

Исследуемый лабораторный ВЧ ионный источник имел кварцевую ГРК цилиндрической формы диаметром 10 см и высотой 7 см, на боковую поверхность которой был навит охлаждаемый водой спиральный индуктор, имевший 3,5 витков. Использовалась трёх-

электродная титановая ИОС с расстоянием между электродами 0,7 мм и толщиной электродов 1 мм. В районе ИОС был расположен электромагнит, позволявший создавать в области ГРК слаборасходящееся магнитное поле индукцией 0–72 Гс. Схема лабораторного источника ионов показана на (рис. 1). Источник был закреплён на фланце вакуумной камеры, через который подводился рабочий газ и ВЧ-напряжение к индуктору. Индуктор был соединён с ВЧ источником питания HF Power GKA-0K5.13M56.1.0.0 через систему согласования L-типа.

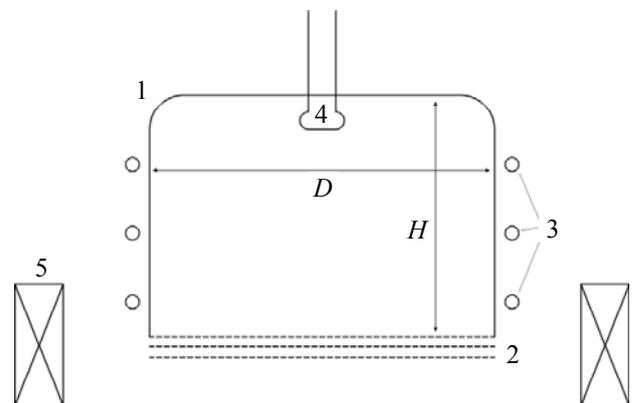


Рис. 1. Схема лабораторного источника ионов. 1 – ГРК; 2 – ИОС; 3 – индуктор; 4 – газораспределитель; 5 – электромагнит. $D = 10$ см, $H = 7$ см

Для нахождения ВЧ-тока, проходящего через индуктор, на его заземлённом конце был помещён пояс Роговского. Также с его помощью производилась оценка доли мощности, вложенной в плазму, по методу, описанному в [26].

Зависимость проходящего через ИОС ионного тока от времени в течение импульса находилась с помощью включённого последовательно в цепь эмиссионного электрода сопротивления в 100 Ом. С помощью двухканального цифрового осциллографа с функцией сохранения снималась временная зависимость падения напряжения на указанном сопротивлении с использованием резистивных делителей.

Для оценки параметров плазмы внутри ГРК использовался ВЧ скомпенсированный ионный зонд. Зонд имел диаметр 0,5 мм и длину 7 мм, и продевался в ГРК извне через расширенное до диаметра 2 мм центральное отверстие ИОС. Во время зондовых измере-

ний электроды ИОС заземлялись. С целью ВЧ компенсации в цепи зонда присутствовали резонансные фильтры-пробки, настроенные на частоты 13,56 и 27 МГц.

Эксперимент проводился при следующих параметрах: частота ВЧ-напряжения 13,56 МГц, ВЧ-мощность в импульсе P_{rf} 100–200 Вт, частота пульсаций 5 кГц, коэффициент заполнения 50 %, расход рабочего газа (аргон) 12 мл/мин, напряжение на эмиссионном электроде 1100 В, напряжение на ускоряющем электроде –100 В, индукция внешнего магнитного поля 0–72 Гс. Остаточное давление в вакуумной камере составляло 0,03 мТор. Давление в вакуумной камере во время работы источника было 0,5 мТор.

Результаты и их обсуждение

Перед тем, как рассмотреть параметры источника при его работе в импульсном режиме, были измерены полученные ионные токи при работе источника в постоянном режиме. При ВЧ-мощности 100 Вт и расходе

аргона 12 мл/мин был получен ток 97 мА. Присутствовала зависимость ионного тока от индукции внешнего магнитного поля. В диапазоне магнитных полей от 15 до 40 Гс извлечённый ионный ток составлял величину около 110 мА, после чего падал до 90 мА при магнитном поле 60 Гс и далее рос до 124 мА при 70 Гс. Доля вложенной в разрядную плазму ВЧ-мощности росла от 53 % до 72 % с увеличением внешнего магнитного поля от 0 до 72 Гс. Причины появления подобной зависимости рассмотрены в работе [8].

Типичный вид временных зависимостей ионного тока и ВЧ-тока индуктора изображен на (рис. 2). ВЧ-ток достигал максимума за 5,4 мкс, а после выключения ВЧ-мощности падал до нуля за 1,6 мкс. Ионный ток достигал максимума за ~12 мкс, и выходил на равновесное значение за ~38 мкс. Стоит отметить, что во время выключения ВЧ-мощности ионный ток падал, но не достигал нуля: в момент начала следующего импульса он составлял примерно 4–мА при погрешности измерения в 2 мА.

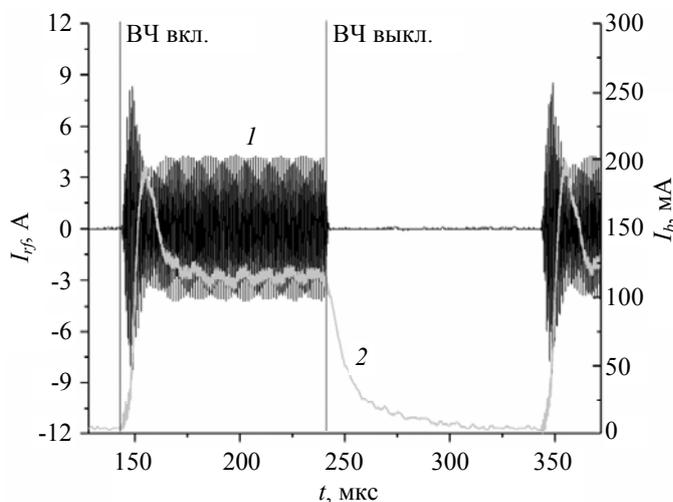


Рис. 2. Временные зависимости ВЧ-тока через индуктор I_{rf} (1) и извлечённого ионного тока I_b (2). $P_{rf} = 120$ Вт, $V = 24$ Гс, расход аргона 12 мл/мин

Рассмотрим влияние внешнего магнитного поля на извлекаемый ионный ток. Это влияние может проявляться в зависимости от магнитного поля равновесной величины ионного тока и зависимости скорости падения ионного тока после выключения ВЧ-мощности за счёт ограничения электронной диффузии на стенки ГРК. В проведённом эксперименте при всех исследованных параметрах разряда какое-либо влияние магнитного поля на скорость падения ионного тока отсут-

ствовало. Максимальная величина ионного тока достигалась при магнитных полях около 24 Гс, что примерно соответствовало максимуму ионного тока, наблюдавшемуся в постоянном режиме работы источника. Рост ионного тока при магнитных полях больше 60 Гс, наблюдавшийся в постоянном режиме работы, в данном случае отсутствовал.

Важным вопросом является влияние системы согласования на временную зависимость ионного тока. Параметры системы со-

гласования (величина переменных вакуумных емкостей), обеспечивающие минимум отражённой ВЧ-мощности, отличаются для случаев наличия и отсутствия разрядной плазмы в ГРК. Во время эксперимента параметры системы согласования не менялись в течение импульса, и обеспечивали минимизацию средней отражённой ВЧ-мощности, что примерно соответствовало согласованию при постоянном режиме работы. Это означало, что в момент включения ВЧ-мощности мгновенная величина отражённой мощности могла быть велика. Для примера, конфигурация системы согласования, обеспечивающая в среднем за импульс 2 Вт отражённой мощности при 120 Вт подаваемой мощности в отсутствие разряда давала 30 Вт отражённой мощности. Так как для максимизации извлечённого ионного тока нас интересует получение наиболее

быстрого роста ионного тока в момент включения ВЧ-мощности, имеет смысл рассмотреть работу источника с системой согласования, настроенной на минимизацию отражённой ВЧ-мощности в отсутствие разрядной плазмы. Такое согласование минимизирует отражённую ВЧ-мощности в начальный момент импульса. Рисунок 3 показывает временные зависимости ионного тока для двух настроек системы согласования: минимизации средней за импульс отражённой мощности и отражённой мощности без разряда. Видно, что во втором случае максимальное значение ионного тока действительно достигается быстрее (11,5 мкс против 15,4 мкс). Однако разница мала, а падение величины максимального ионного тока (из-за рассогласования в состоянии с разрядной плазмой) сводит на нет любые преимущества второй настройки системы согласования.

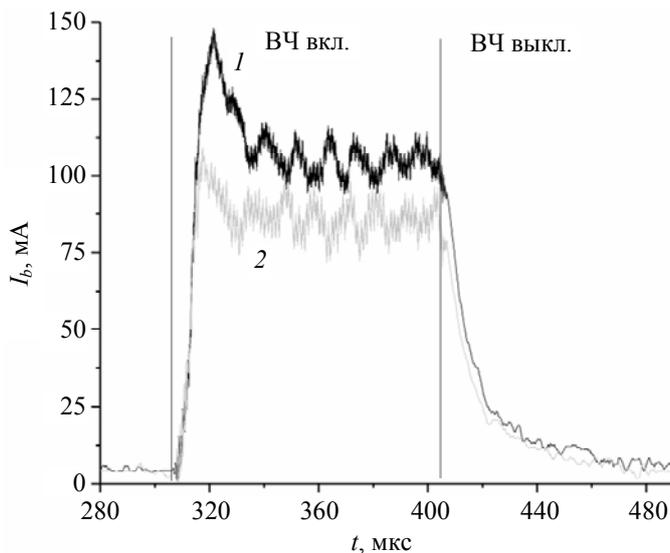


Рис. 3. Временные зависимости извлечённого ионного тока I_b для двух различных настроек системы согласования: 1 – настройки на минимизацию средней за импульс отражённой мощности; 2 – настройки на минимизацию отражённой ВЧ-мощности в отсутствие разрядной плазмы. $P_{rf} = 120$ Вт, $\nu = 0$ Гс, расход аргона 12 мл/мин

Если рассмотреть временную зависимость логарифма ионного тока после выключения ВЧ-мощности, то можно выделить два линейных участка: участок с большим наклоном в первые 17 мкс после выключения ВЧ-мощности, и участок с меньшим наклоном в последующее время. Диссипация разрядной плазмы происходит за счёт ряда процессов, в число которых входит уход частиц на стенки ГРК (при давлениях, характерных для ионных источников, частицы уходят в режиме свободного пролёта), трёхчастичная деионизация, Пеннинг-процессы и т. д. Более подробно в рамках численной модели процесс деиониза-

ции был рассмотрен в предыдущей работе [25]. Отмеченные линейные участки указывают нам на изменение относительного вклада указанных процессов и опосредованно свидетельствуют об изменении электронной температуры. Зондовые измерения показывают, что практически мгновенно после выключения ВЧ-мощности температура электронов падает с равновесного значения 4–6 эВ до величины порядка 1 эВ и слабо меняется в последующие 18 мкс, что примерно по времени соответствует первому линейному участку. Затем электронная температура снова падает, но уже не может быть определена использованной нами

зондовой методикой, так как оказывается меньше погрешности измерений в 0,5 эВ.

Получаемый в ходе работы ВЧ-источника в импульсном режиме выигрыш ионного тока зависит от соотношения скорости роста ионного тока при включении ВЧ-мощности и скорости падения ионного тока при её выключении, что демонстрирует (рис. 4). Площадь прямоугольника, заключённого между двумя вертикальными линиями и пунктирной линией, показывает средний ток, получаемый при непрерывном режиме работы источника. Зона **a**, где ВЧ-мощность уже подана, а ионный ток меньше равновесного, определяет потери ионного тока по сравнению с непрерывным режимом работы. Зона **b**, где ВЧ-мощность уже не подаётся, а ионный ток продолжает извлекаться, определяет прирост ионного тока. Разница между площадями этих зон даёт искомую выгоду от

использования импульсного режима. В нашем случае прирост величины C_i тока на единицу поданной мощности в импульсном режиме по сравнению с постоянным режимом составлял от 10 до 20 %. Например, при $P_{rf} = 100$ Вт, $B = 0$ Гс и расходе аргона 12 мл/мин в постоянном режиме был получен ток 97 мА ($C_i = 0,97$ мА/Вт), а в импульсном режиме с частотой пульсаций 5 кГц и коэффициентом заполнения 50 % при той же мощности в импульсе P_{rf} (средняя по времени ВЧ-мощность при этом была 50 Вт) был получен средний ток в 56 мА ($C_i = 1,12$ мА/Вт). Отметим, что эти числа приведены для того случая, когда ВЧ-мощность в импульсе равна ВЧ-мощности при постоянном режиме работы. Случай равенства средней за импульс ВЧ-мощности и ВЧ-мощности при постоянном режиме работы рассмотрен в предыдущей работе [25].

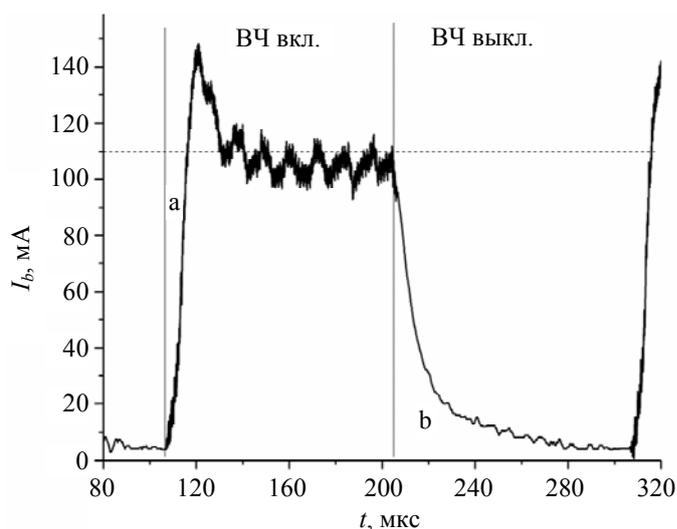


Рис. 4. Временная зависимость извлечённого ионного тока I_b . Пунктирной линией обозначено значение тока при работе источника в постоянном режиме. $P_{rf} = 120$ Вт, $B = 0$ Гс, расход аргона 12 мл/мин

Также на (рис. 4) можно заметить две особенности: перед выходом на равновесное значение ионный ток проходит через максимум, а само равновесное значение, которого достигает ионный ток в импульсе, немного меньше, чем значение ионного тока при постоянном режиме работы. Во время работы в импульсном режиме нами фиксировалось не мгновенное, а среднее за импульс значение подаваемой ВЧ генератором мощности. Картина на (рис. 4) говорит о том, что в начальный момент времени после подачи ВЧ-мощности её величина превышает среднее значение, а после выхода ионного тока к равновесной величине, становится меньше сред-

него значения. Подобное превышение равновесного значения концентрации плазмы в начале импульса было также отмечено в работах [20, 21].

Глядя на (рис. 4) можно отметить, что экспериментально полученный прирост ионного тока в 10–20 % не является пределом. Так как выгода от использования импульсного режима определяется отношением разности площади **b** и **a** к площади прямоугольника, максимизация этой выгоды требует уменьшения времени включения ВЧ-мощности. К сожалению, использовавшийся нами ВЧ-генератор не позволял получить короткие импульсы для непосредственной экспериментальной

проверки, поэтому ограничимся грубыми оценками. Максимальный ионный ток при фиксированной ВЧ-мощности в импульсе должен достигаться в случае отключения ВЧ-мощности в момент достижения ионным током максимума (14 мкс после включения ВЧ-мощности на (рис. 4)). При этом время в состоянии выключенной ВЧ-мощности можно установить в 54 мкс, так как дальнейшее его увеличение не приводит к существенному приросту ионного тока. Это даёт коэффициент заполнения в 20,6 % при частоте пульсаций 14,7 кГц. Если предположить, что темпы падения ионного тока при подобном уменьшении времени ВЧ-импульса останутся неизменными, и использовать за основу зависимость s (рис. 4), то можно получить оценку результирующей зависимости ионного тока и соответствующие ей средние величины. Ей соответствует оценочная величина C_i в 2,47 мА/Вт.

Стоит, однако, отметить, что подобный рост энергетической эффективности сопровождался бы потерями в эффективности использования рабочего газа, так как во время выключения ВЧ-мощности в течение 79,6 % периода пульсаций рабочий газ продолжает поступать в ГРК. Чтобы избежать такого падения можно перейти к промежуточным вариантам, когда время в состоянии выключенной ВЧ-мощности уменьшено.

Дополнительно отметим, что представленные результаты лишь демонстрируют возможность использования импульсного разряда для повышения эффективности ВЧ ионного источника. Скорость нарастания ВЧ-тока через индуктор помимо параметров разрядной цепи существенно зависит от устройства используемого ВЧ-генератора. Поэтому получаемые приросты ионного тока по сравнению с непрерывным режимом могут оказаться иными (как больше, так и меньше, и даже отрицательными) в случае использования других моделей ВЧ-генераторов. При этом даже если ВЧ-генератор выдаёт в импульсном режиме на требуемой частоте сигнал с идеально прямоугольной огибающей, установление равновесного значения ионного тока, естественно, не будет мгновенным, так как оно ограничено характерными временами установления электронной температуры и концентрации плазмы в ГРК.

Заключение

Экспериментальное исследование ВЧ ионного источника показало возможность его работы на ВЧ импульсном разряде с большей энергетической эффективностью: продемонстрирован прирост ионного тока на 10–20 % по сравнению с непрерывным ВЧ-разрядом на аргоне.

Обнаружено отсутствие влияния постоянного магнитного поля в исследованном диапазоне (0–72 Гс) на скорость падения ионного тока после окончания подачи ВЧ-мощности. При магнитном поле 24 Гс ионный ток достигает максимального значения как в импульсном, так и в постоянном режиме работы источника ионов.

В рассмотренном ионном источнике влияние рассогласования (при настройке системы согласования на минимизацию средней за импульс отражённой мощности) в начальные моменты импульса на рост ионного тока мало.

Исследование выполнено по гранту
Российского научного фонда № 21-72-10090,
<https://rscf.ru/project/21-72-10090/>

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. Groh K. H., Loeb H. W. / J. Prop. Power. 1991. Vol. 7. № 4. P. 573. doi: 10.2514/3.23364
4. Killinger R., Leiter H., Kukies R. / Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. – Cincinnati, 2007. AIAA 2007-5200. doi: 10.2514/6.2007-5200
5. Leiter H. J. et al. / Proceedings of the 27th IEPC. – Pasadena, 2001. IEPC-01-104.
6. Turkoz E., Celik M. / Proceedings of 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies. – Istanbul, 2013. P. 511–516. doi: 10.1109/RAST.2013.6581262
7. Loeb H. W. et al. / Proceedings of the 29th IEPC. – Princeton University, 2005. IEPC-2005-031.
8. Kralkina E. A. et al. / Vacuum. 2019. Vol. 167. P. 136. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.05.041
9. Godyak V. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. Vol. 46. P. 283001. doi: 10.1088/0022-3727/46/28/283001
10. Hebner G. A., Fleddermann C. B. / J. Appl. Phys. 1997. Vol. 82. Is. 6. P. 2814. doi: 10.1063/1.366277
11. Han J. et al. / Phys. Plasmas. 2020. Vol. 27. P. 063509. doi: 10.1063/5.0007288

12. Park J. H. et al. / Plasma Sources Sci. Technol. 2017. Vol. 26. P. 055016. doi: 10.1088/1361-6595/aa61c2
13. Saikia P. et al. / Phys. Plasmas. 2017. Vol. 24. P. 013503. doi: 10.1063/1.4973233
14. Tang X. M., Manos D. M. / Plasma Sources Sci. Technol. 1999. Vol. 8. P. 594. doi: 10.1088/0963-0252/8/4/311
15. Lieberman M. A., Ashida S. / Plasma Sources Sci. Technol. 1996. Vol. 5. P. 145. doi: 10.1088/0963-0252/5/2/006
16. Subramonium P., Kushner M. J. / Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. P. 721. doi: 10.1063/1.1776617
17. Ramamurthi B., Economou D. J. / Plasma Sources Sci. Technol. 2002. Vol. 11. P. 324. doi: 10.1088/0963-0252/11/3/315
18. Subramonium P., Kushner M. J. / J. Vac. Sci. Technol. A. 2002. Vol. 20. P. 325. doi: 10.1116/1.1434965
19. Lymberopoulos D. P., Kolobov V. I., Economou D. J. / J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. Vol. 16. P. 564. doi: 10.1116/1.581072
20. Gao F. et al. / J. Appl. Phys. 2019. Vol. 126. P. 093302. doi: 10.1063/1.5114661
21. Lv X. Y. et al. / Chin. Phys. B. 2021. Vol. 30. P. 045202. doi: 10.1088/1674-1056/abd16b
22. Han J. et al. / Phys. Plasmas. 2019. Vol. 26. P. 103503. doi: 10.1063/1.5115415
23. Qu C. H., Nam S. K., Kushner M. J. / Plasma Sources Sci. Technol. 2020. Vol. 29. P. 085006. doi: 10.1088/1361-6595/aba113
24. Aanesland A. et al. / J. Phys.: Conf. Ser. 2009. Vol. 162. P. 012009. doi: 10.1088/1742-6596/162/1/012009
25. Zadiriev I. et al. / Plasma Sci. Technol. 2023. Vol. 25. P. 025405. doi: 10.1088/2058-6272/ac8fca
26. Kralkina E. A. et al. / AIP Advances. 2018. Vol. 8. P. 035217. doi: 10.1063/1.5023631

PACS: 52.75.Di

Pulsed inductive RF discharge as an effective working process of an RF ion source

I. I. Zadiriev, E. A. Kralkina, K. V. Vavilin, A. M. Nikonov and G. V. Shvidkiy

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

Received 10.04.2023; revised 17.04.2023; accepted 19.04.2023

The paper experimentally considers a pulsed RF discharge as a working process of an RF ion source. It is shown that when operating on such a discharge, an increase in the ion current can be obtained in comparison with the continuous mode of operation. This increase is the greater, the greater the difference between the characteristic time of the fall of the ion current after turning off the RF power and the rise time of the ion current when the RF power is turned on. The pulsation parameters at which the ion current is maximized are estimated. It is shown that an external constant longitudinal magnetic field in the range of 0–7.2 mT nonmonotonically affects the maximum and equilibrium value of the ion current in a pulse and does not affect the rate of decrease in the ion current after turning off the RF power.

Keywords: radio frequency (RF), discharge, plasma, pulsed, electrons, ions.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-213-220

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. Groh K. H. and Loeb H. W., *J. Prop. Power.* **7** (4), 573 (1991). doi: 10.2514/3.23364
4. Killinger R., Leiter H. and Kukies R., *Proceedings of the 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Cincinnati, 2007. AIAA 2007-5200. doi: 10.2514/6.2007-5200
5. Leiter H. J. et al., *Proceedings of the 27th IEPC*, Pasadena, 2001. IEPC-01-104.
6. Turkoz E., Celik M., *Proceedings of 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, Istanbul, 2013, pp. 511–516. doi: 10.1109/RAST.2013.6581262
7. Loeb H. W. et al., *Proceedings of the 29th IEPC*, Princeton University, 2005. IEPC-2005-031.
8. Kralkina E. A. et al., *Vacuum* **167**, 136 (2019). doi: 10.1016/j.vacuum.2019.05.041
9. Godyak V., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 283001 (2013). doi: 10.1088/0022-3727/46/28/283001
10. Hebner G. A. and Fleddermann C. B., *J. Appl. Phys.* **82** (6), 2814 (1997). doi: 10.1063/1.366277
11. Han J. et al., *Phys. Plasmas* **27**, 063509 (2020). doi: 10.1063/5.0007288
12. Park J. H. et al., *Plasma Sources Sci. Technol.* **26**, 055016 (2017). doi: 10.1088/1361-6595/aa61c2
13. Saikia P. et al., *Phys. Plasmas* **24**, 013503 (2017). doi: 10.1063/1.4973233
14. Tang X. M. and Manos D. M., *Plasma Sources Sci. Technol.* **8**, 594 (1999). doi: 10.1088/0963-0252/8/4/311
15. Lieberman M. A. and Ashida S., *Plasma Sources Sci. Technol.* **5**, 145 (1996). doi: 10.1088/0963-0252/5/2/006
16. Subramonium P. and Kushner M. J., *Appl. Phys. Lett.* **85**, 721 (2004). doi: 10.1063/1.1776617
17. Ramamurthi B. and Economou D. J., *Plasma Sources Sci. Technol.* **11**, 324 (2002). doi: 10.1088/0963-0252/11/3/315
18. Subramonium P. and Kushner M. J., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **20**, 325 (2002). doi: 10.1116/1.1434965
19. Lymberopoulos D. P., Kolobov V. I. and Economou D. J., *J. Vac. Sci. Technol. A*, **16**, 564 (1998). doi: 10.1116/1.581072
20. Gao F. et al., *J. Appl. Phys.* **126**, 093302 (2019). doi: 10.1063/1.5114661
21. Lv X. Y. et al., *Chin. Phys. B*, **30**, 045202 (2021). doi: 10.1088/1674-1056/abd16b
22. Han J. et al., *Phys. Plasmas* **26**, 103503 (2019). doi: 10.1063/1.5115415
23. Qu C. H., Nam S. K. and Kushner M. J., *Plasma Sources Sci. Technol.* **29**, 085006 (2020). doi: 10.1088/1361-6595/aba113
24. Aanesland A. et al., *J. Phys.: Conf. Ser.* **162**, 012009 (2009). doi: 10.1088/1742-6596/162/1/012009
25. Zadiriev I. et al. *Plasma Sci. Technol.* **25**, 025405 (2023). doi: 10.1088/2058-6272/ac8fca
26. Kralkina E. A. et al., *AIP Advances*, **8**, 035217 (2018). doi: 10.1063/1.5023631