

04.1;13.4

Использование импульсного высокочастотного разряда для увеличения эффективности сеточного ионного двигателя

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

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: iizadiriev@yandex.ru

Поступило в Редакцию 16 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 11 мая 2024 г.

Принято к публикации 13 мая 2024 г.

Представлены результаты экспериментального исследования лабораторного сеточного ионного двигателя при его работе на импульсном индуктивном высокочастотном разряде и различных рабочих газах: аргоне, кислороде и азоте. Показано, что использование подобного разряда приводит к увеличению извлекаемого ионного тока по сравнению с таковым при непрерывных режимах работы.

Ключевые слова: ионный двигатель, высокочастотный разряд, импульсный разряд.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.17.58576.19955

Сеточные ионные двигатели (ИД) на основе высокочастотного (ВЧ) разряда — одни из самых активно применяемых электрических ракетных двигателей на космических аппаратах. Подробно их устройство и принцип действия описаны в работах [1–6]. На данный момент используемые в космической отрасли ВЧ ИД являются глубоко оптимизированными устройствами с точки зрения конструкции и основных процессов: вложения ВЧ-мощности в разрядную плазму и извлечения ионов через ионно-оптическую систему (ИОС). Однако связанный с освоением низких околоземных орбит и развитием малых космических аппаратов процесс масштабирования ИД в сторону малых размеров и мощностей сопровождается ухудшением их параметров эффективности [6–8], поэтому нужен поиск новых, еще не исчерпавших себя способов увеличения параметров ВЧ ИД. В настоящей работе рассматривается использование импульсного индуктивного ВЧ-разряда для увеличения извлекаемого из ВЧ ИД ионного тока (возможность этого была продемонстрирована в наших прошлых публикациях по данной тематике [9,10]). Настоящая работа дополняет результаты прошлых публикаций, при этом она фокусируется на конкретных величинах прироста ионного тока для рабочих газов (кислород и азот), являющихся остаточными атмосферными газами на низких околоземных орбитах (~ 200 km).

В качестве исследуемого лабораторного ВЧ ИД использовался сеточный источник ионов с цилиндрической газоразрядной камерой (ГРК) диаметром 10 см, длиной 7.5 см и трехэлектродной ИОС. Рассматривалась средняя по времени ВЧ-мощность до 300 W (падающая за вычетом отраженной), причем отраженная ВЧ-мощность в импульсном режиме была больше, чем в непрерывном, однако не превышала 10% от падающей мощности. Рабочая частота составляла 13.56 MHz, а частота пульсаций была равна 5 или 10 kHz с коэффициентом заполнения от 40 до 100%. В качестве рабочих газов

использовались аргон, кислород и азот. Расходы рабочих газов изменялись в диапазоне от 12 до 36 sccm. ГРК помещалась в продольное внешнее магнитное поле с индукцией от 0 до 72 G. Диапазон магнитных полей был выбран исходя из описанных в работе [2] соображений оптимизации вложения ВЧ-мощности в разряд. В ходе эксперимента измерялись ВЧ-токи через антенну с помощью пояса Роговского и временные зависимости тока в цепи эмиссионного электрода ИОС, а также параметры потока частиц из ИД с помощью четырехсеточного энергоанализатора.

Форма огибающей сигнала ВЧ-тока через антенну и ионный ток пучка I_b изображены на рис. 1. Передний и задний фронты импульса ВЧ-тока резкие, в то время как ионный ток после начала импульса выходит на стационарное значение при времени около $20 \mu\text{s}$, а после окончания импульса не успевает упасть до нуля вплоть до момента начала следующего импульса, однако основное падение тока происходит также примерно за $20 \mu\text{s}$.

За счет наличия значительного тока I_b после окончания импульса ВЧ-тока появляется выигрыш в среднем по времени токе пучка при тех же величинах средней по времени ВЧ-мощности, подводимой к разряду, по сравнению со случаем непрерывного режима работы, что было более подробно рассмотрено в [9]. Этот выигрыш меняется с коэффициентом заполнения и для выбранных частот пульсаций (5 и 10 kHz) максимален в диапазоне коэффициентов заполнения от 40 до 70%. Для всех рассмотренных рабочих газов (аргон, кислород, азот) по абсолютной величине выигрыш в ионном токе за счет перехода к импульсному режиму составлял до 30 mA и зависел от ВЧ-мощности. Типичный вид этой зависимости приведен на рис. 2. По мере роста средней по времени подводимой к разряду ВЧ-мощности выгода от перехода на импульсный режим уменьшается. Однако использовавшийся в работе ВЧ-генератор не мог превышать величину мгновенной ВЧ-мощности в им-

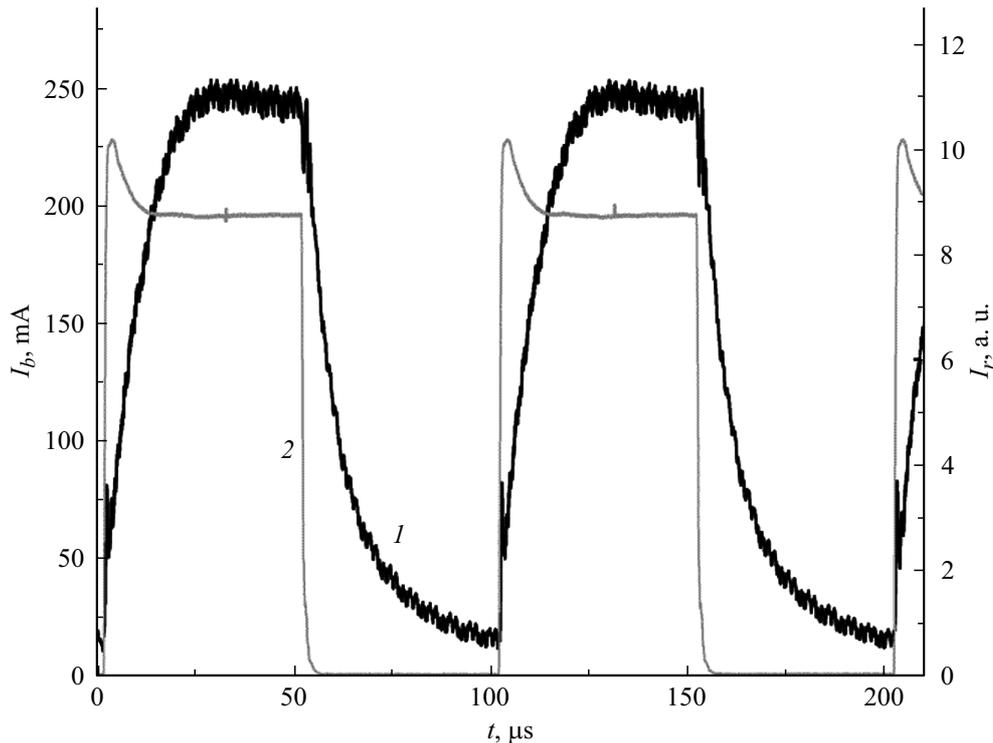


Рис. 1. Временная зависимость извлекаемого ионного тока I_b (1) и амплитуды ВЧ-тока через антенну I_r (2). Расход рабочего газа (аргон) 24 сссм, ВЧ-мощность 140 W, частота пульсаций 10 kHz, внешнее магнитное поле отсутствует.

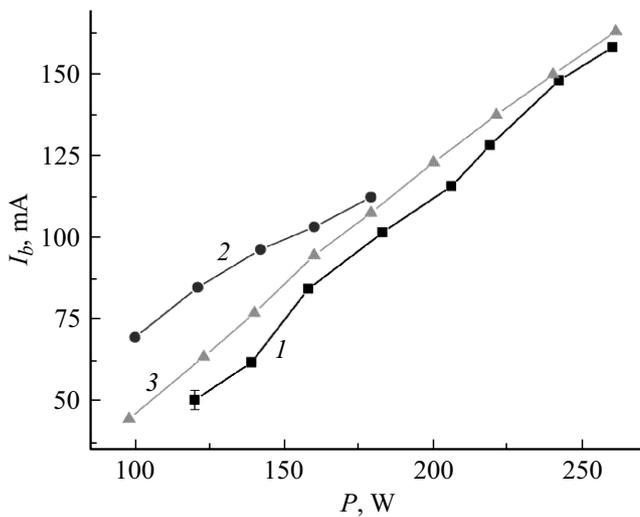


Рис. 2. Зависимость извлекаемого ионного тока I_b от средней по времени ВЧ-мощности для непрерывного режима (1) и импульсных режимов с коэффициентами заполнения 40 (2) и 70% (3). Расход рабочего газа (азот) 24 сссм, индукция внешнего магнитного поля 19 G, частота пульсаций 10 kHz.

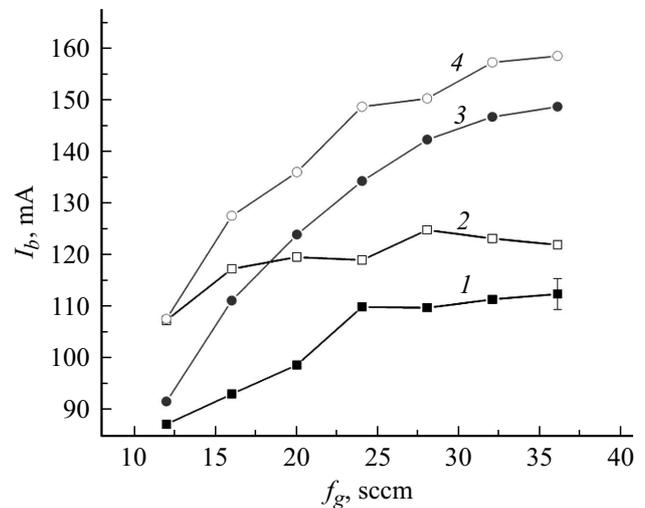


Рис. 3. Зависимости извлекаемого ионного тока I_b от расхода рабочего газа для азота (1, 2) и кислорода (3, 4). Кривые 1 и 3 соответствуют непрерывному режиму работы, а кривые 2 и 4 — импульсному режиму с частотой пульсаций 10 kHz и коэффициентом заполнения 70%. ВЧ-мощность 200 W, индукция внешнего магнитного поля 19 G.

пульсе 500 W, что соответственно ограничивало исследуемый диапазон средних ВЧ-мощностей в зависимости от коэффициента заполнения (см., например, кривую 2 на рис. 2). Также описанный выигрыш в ионном токе зависит от расхода рабочего газа, что иллюстрирует

рис. 3. Как видно из приведенных графиков, импульсный режим работы наиболее эффективен в случае его использования при малых расходах рабочего газа и низких ВЧ-мощностях (менее 200 W).

Влияния магнитного поля в рассмотренном диапазоне его индукции на скорость падения ионного тока после окончания ВЧ-импульса обнаружено не было. Возможно, это вызвано ролью ИОС и создаваемых ей в плазме электрических полей в фазе деионизации. Однако следует отметить, что импульсный режим при работе лабораторного ИД на кислороде был реализуем только при наличии магнитного поля (без него разряд гас).

Была рассмотрена возможность извлечения электронов через ИОС при напряжении на эмиссионном электроде -100 V . Временная зависимость извлеченного электронного тока полностью повторяет аналогичную зависимость для ионов при тех же внешних параметрах разряда, однако электронный ток примерно в 2 раза превосходит ионный ток. Например, для кривой ионного тока, изображенной на рис. 1, максимум достигается при 245 mA ; соответствующая кривая электронного тока имела максимум при 460 mA . Величина электронного тока, по всей видимости, ограничена максимальным ионным током, приходящим из плазмы в ГРК на эмиссионный электрод. При работе на кислороде извлечения отрицательных ионов не обнаружено. Полученные величины электронного тока позволяют рассматривать возможность использования сеточного ВЧ-источника ионов в качестве катода-компенсатора в тех случаях, когда затруднена работа традиционных катодов-компенсаторов из-за наличия остаточных газов верхних слоев атмосферы.

Экспериментально продемонстрирована возможность увеличения извлекаемого ионного тока в ВЧ ИД, работающем на аргоне, кислороде и азоте, на величину до 30 mA за счет перехода к импульсному ВЧ-разряду в ГРК. В относительных величинах выигрыш в токе составил около 15, 10 и 25% соответственно. Указанный относительный выигрыш в ионном токе уменьшается при увеличении ВЧ-мощности и расхода рабочего газа. Показана возможность извлечения через ИОС электронов. Извлекаемый электронный ток превосходит ионный ток приблизительно в 2 раза в рассмотренном диапазоне параметров разряда.

Благодарности

Исследование выполнялось с использованием оборудования, приобретенного Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова в рамках закупок: „Диагностический комплекс для системы управления параметрами специализированных реакторов с ВЧ и СВЧ активацией плазмы“ и „Оборудование для комплектации лаборатории по изучению и разработке широкого спектра методов создания новых наноструктурированных функциональных материалов и устройств на их основе“.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10090 (<https://rscf.ru/project/21-72-10090/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] H.J. Leiter, H.W. Loeb, K.-H. Schartner, in *Proc. 3rd Int. Conf. on spacecraft propulsion* (Cannes, Italy, 2000), ESA SP-465.
- [2] E.A. Kralkina, K.V. Vavilin, I.I. Zadiriev, P.A. Nekliudova, G.V. Shvydkiy, *Vacuum*, **167**, 136 (2019). DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.05.041
- [3] A.V. Melnikov, S.A. Khartov, *Therm. Eng.*, **65**, 980 (2019). DOI: 10.1134/S0040601518130086
- [4] S.V. Kaney, S.A. Khartov, V.V. Nigmatzyanov, *Procedia Eng.*, **185**, 31 (2017). DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.287
- [5] P.E. Masherov, V.A. Riaby, V.A. Godyak, *Rev. Sci. Instrum.*, **87**, 02B926 (2016). DOI: 10.1063/1.4935003
- [6] N.N. Antropov, R.V. Akhmetzhanov, A.V. Bogaty, G.A. Dyakonov, G.A. Popov, A.I. Belogurov, P.A. Dronov, A.V. Ivanov, S.A. Khartov, in *Proc. Joint Conf. of 30th Int. Symp. on Space Technology and Science, 34th Int. Electric Propulsion Conf. and 6th Nano-satellite Symp.* (Hyogo-Kobe, Japan, 2015). IEP-2015-322/ISTS-2015-b-322.
- [7] R.E. Wirz, in *Proc. Joint Conf. of 30th Int. Symp. on Space Technology and Science, 34th Int. Electric Propulsion Conf. and 6th Nano-satellite Symp.* (Hyogo-Kobe, Japan, 2015). IEP-2015-275/ISTS-2015-b-275.
- [8] H.J. Leiter, C. Altmann, D. Lauer, R. Kukies, in *Proc. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf.* (Cleveland, USA, 2015), AIAA 2014-3911. DOI: 10.2514/6.2014-3911
- [9] I. Zadiriev, E. Kralkina, K. Vavilin, A. Nikonov, G. Shvidkiy, *Plasma Sci. Technol.*, **25**, 025405 (2023). DOI: 10.1088/2058-6272/ac8fca
- [10] И.И. Задириев, Е.А. Кралькина, К.В. Вавилин, А.М. Никонов, Г.В. Швыдкий, *Успехи прикладной физики*, **11** (3), 213 (2023). DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-3-213-220