

УДК 533.9.07

О возможности использования емкостного ВЧ-разряда в источнике плазмы с замкнутым дрейфом электронов

И. И. Задириев, А. А. Рухадзе, Е. А. Кралькина, К. В. Вавилин, В. Б. Павлов

Проведено исследование энергетических распределений ионов в плазменной струе, полученной при помощи емкостного ВЧ-разряда во внешнем радиальном магнитном поле внутри тороидального разрядного канала. Показано, что посредством такого разряда на мощностях 100—200 Вт можно создать ускоренный поток ионов с энергиями 230 эВ.

PACS: 52.75.Di, 52.80.Pi

Ключевые слова: высокочастотный разряд, источник плазмы, замкнутый дрейф электронов.

Введение

Одним из наиболее популярных семейств электрических ракетных двигателей, используемых на космических аппаратах, являются устройства на основе разряда постоянного тока в скрещенных электрическом и магнитном полях, в которых возникает замкнутый азимутальный дрейф электронов внутри тороидального разрядного канала. В основном эти двигатели находят своё применение для задач поддержания и коррекции орбит искусственных спутников Земли, а в перспективе могут оказаться незаменимы в деле исследования дальнего космоса [1]. Отечественные устройства данного класса включают в себя двигатель с анодным слоем (ДАС) и стационарный плазменный двигатель (СПД). Детальное их описание и основные принципы работы можно найти в [1—3]. СПД используется на орбитальных космических аппаратах с 1970-х годов. В 1990-х в западных странах начинаются разработки холловских двигателей — аналогов СПД [1].

Бурный рост числа коммерческих спутников за последние 20 лет вкупе с ростом их мощности и массы создал потребность в модернизации существующих схем электрических ракетных двигателей с целью увеличения их удельного импульса и тяги. Это отразилось в появлении большого коли-

чества исследований, посвящённых оптимизации параметров СПД, в частности геометрии магнитного поля в разрядном канале [4, 5], рабочего газа [6], разрядного напряжения и тока [7]. Также стал нарастать интерес к альтернативным схемам получения тяги, связанным с более радикальными изменениями в конструкции двигателя, например [8, 9]. Одним из подобных направлений развития СПД стало создание в канале дополнительного мало-мощного высокочастотного (ВЧ) разряда для более эффективной ионизации рабочего газа [10, 11].

Целью данной работы является рассмотрение емкостного ВЧ-разряда как основного рабочего процесса в источнике плазмы с замкнутым дрейфом электронов.

Предпосылки для работы

Теоретической предпосылкой для подобного рассмотрения является наличие на границах плазмы емкостного ВЧ-разряда квазистационарных электрических полей [12], что позволяет организовать в этих областях замкнутый азимутальный дрейф электронов по аналогии с разрядом постоянного тока. Проведённое ранее математическое моделирование показало, что азимутальный дрейф реализуется в районе среза разрядного канала, а ионы могут быть ускорены квазистационарным электрическим полем по направлению к выходу из источника плазмы [13]. Дополнительным плюсом является то обстоятельство, что для ВЧ-разряда нет необходимости в использовании подогревного катода-нейтрализатора, так как осуществляющие ионизацию нейтрального газа электроны рождаются в самом разрядном канале и там же получают энергию от осциллирующего электрического поля. Помимо этого активный электрод можно сделать внешним, устранив, таким образом, проблемы, связанные с возможностью переосаждения расплывлённого материала электрода на оборудование не-сущего космического аппарата.

Задириев Илья Игоревич, аспирант.

Рухадзе Анри Амвросьевич, гл. научный сотрудник.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

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

Тел. 8 (499) 135-05-49. E-mail: iizadiriiev@gmail.com

Кралькина Елена Александровна, вед. научный сотрудник.

Вавилин Константин Викторович, научный сотрудник.

Павлов Владимир Борисович, старший научный сотрудник.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2015 г.

© Задириев И. И., Рухадзе А. А., Кралькина Е. А., Вавилин К. В., Павлов В. Б., 2015

Принимая вышеописанное во внимание, нами была поставлена задача экспериментально реализовать емкостной ВЧ-разряд в геометрии источника плазмы с замкнутым дрейфом электронов и исследовать энергетические распределения выходящих из разрядного канала ионов.

Схема эксперимента

Эксперимент проводился на модифицированной лабораторной модели СПД-70, схема которой приведена на рис. 1. Для питания разряда использовался генератор синусоидального напряжения частотой 13,56 МГц и система согласования из двух переменных вакуумных конденсаторов и катушки индуктивности. Подаваемая на разряд мощность варьировалась от 100 до 250 Вт, при этом отражённая мощность не превышала 20 Вт. Активный электрод был заземлён по постоянному напряжению через катушку индуктивности системы согласования. На него же подавалось переменное напряжение с генератора. Подобная схема включения ВЧ-разряда позволяет максимизировать средний по времени потенциал плазмы относительно земли (до величины порядка приложенной к разряду амплитуды напряжения [12]), что должно было соответствующим образом отразиться на значениях средней энергии выходящих из разрядного канала ионов. Магнитное поле в разрядном канале регулировалось посредством задания постоянного тока через последовательно включённые катушки магнитной системы, причём на срезе разрядного канала оно было преимущественно радиальным, а по мере продвижения вглубь разрядного канала оно ослабевало, и появлялась продольная компонента магнитного поля. Около активного электрода индукция магнитного поля по величине была в 8—10 раз меньше, чем около выхода из канала, где она задавалась в пределах от 0 Гс (без учёта остаточного намагничивания ферромагнитных элементов конструкции и фонового магнитного поля Земли) до 200 Гс.

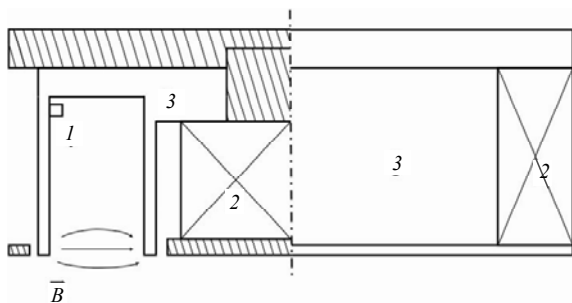


Рис. 1. Схема лабораторной модели источника ионов. 1 — активный электрод, 2 — магнитные катушки, 3 — керамические стенки разрядного канала. На схеме показано направление силовых линий магнитного поля в районе среза канала. Штриховкой отмечены сечения элементов магнитопровода

Рабочий газ (аргон) подавался в разрядный канал через газораспределительную систему вблизи активного электрода. Величина потока составляла 0,6—1,6 мг/с, а остаточное давление в вакуумной камере при этом было соответственно в пределах от 0,4 до 1 мТорр. Для анализа ионного потока использовался четырёхсеточный энергоанализатор, располагавшийся напротив источника ионов на расстоянии 40 см от него. Оценка плотности ионного потока производилась посредством плоского зонда, помещённого рядом с энергоанализатором.

Результаты

Полученный разряд имел вид азимутально однородного кольца, расположенного в разрядном канале между его срезом и активным электродом. При малых магнитных полях (<50 Гс) разряд терял азимутальную однородность и, как правило, угасал. Во всём промеренном диапазоне мощностей разрядное напряжение менялось незначительно и составляло ~450 В. Характерный вид полученной функции плотности распределения ионов по энергии изображён на рис. 2.

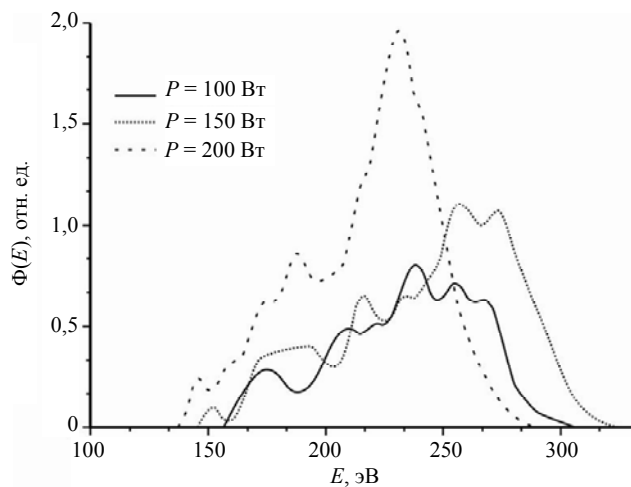


Рис. 2. Вид функций распределения ионов по энергии $\Phi(E)$ в отн. ед. для разных значений мощности разряда P . E — энергия ионов. Распределения снимались при потоке аргона величиной 1 мг/с и магнитном поле на срезе разрядного канала 160 Гс. Функции распределения нормированы на полный ионный ток на коллектор энергоанализатора

Чаще всего она имела 2 максимума с энергиями 160 и 230 эВ. Энергии второго, более интенсивного максимума находились в прямом соответствии с амплитудой приложенного к разряду напряжения (менялись пропорционально ей и составляли половину этой амплитуды). Это свидетельствует в пользу представления о том, что энергии покидающих разрядный канал ионов определяются средним за период колебаний разрядного напряжения потенциалом плазмы относи-

тельно земли, так как основное влияние на движение ионов оказывают квазистационарные поля. Данное обстоятельство является следствием того, что ионы в разряде, в отличие от электронов, не замагничены, а время пролёта иона через пограничный слой плазмы, в котором велики осциллирующие высокочастотные поля, намного превосходит период колебаний этих полей.

Увеличение магнитного поля от 100 до 200 Гс приводило к незначительному (на 30 эВ) снижению энергии ионов, что могло объясняться как изменением среднего за период потенциала плазмы, так и увеличением расходимости ионной струи. Значительно большим было влияние магнитного поля на плотность выходящего из разрядного канала ионного потока (см. рис. 3). Это, по всей видимости, связано с увеличением концентрации разрядной плазмы с ростом индукции магнитного поля по причине замагничивания электронов и их запираания в разряде на замкнутых азимутальных траекториях в области магнитного поля с преимущественно радиальной компонентой. Замагниченные электроны не могут свободно покинуть разряд и поэтому эффективно ионизируют нейтральный газ за счёт поглощаемой ими энергии электрического ВЧ-поля.

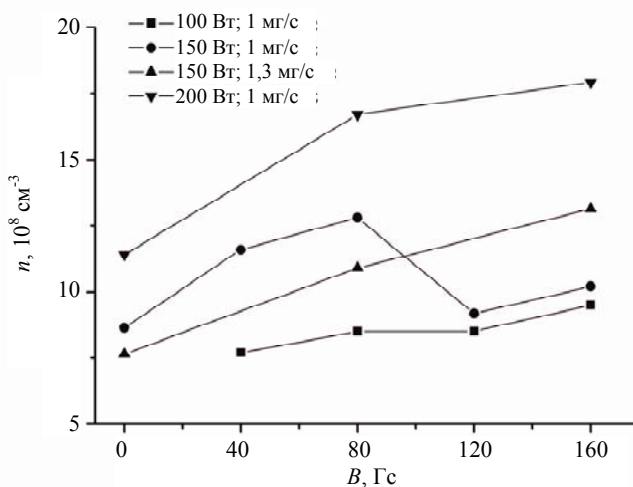


Рис. 3. Зависимость концентрации ионов в струе от величины магнитного поля B для различных значений мощности разряда и потоков рабочего газа

Влияние расхода аргона в исследованном диапазоне его значений на энергетические характеристики ионной струи было слабым. Наименьшие значения расхода, при которых разряд всё

ещё был стационарен и не гас, составляли, в зависимости от вложенной в разряд мощности, от 0,6 до 1 мг/с.

Заключение

Результаты измерений показали наличие на выходе из разрядного канала ионной струи со средней энергией в районе 230 эВ и плотностью 10^9 см^{-3} . На этом основании сделан вывод о принципиальной возможности использования емкостного ВЧ-разряда в источнике плазмы с замкнутым дрейфом электронов для получения тяги. Однако оценка параметров эффективности, которые могут быть получены в подобной схеме электрического ракетного двигателя на основе ВЧ-разряда, требует проведения дополнительного исследования как ионной струи, так и самой разрядной плазмы. В частности, интерес представляет расходимость ионной струи и распределение электрического поля (как осциллирующего, так и квазистационарного) внутри разрядного канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ким В. П. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 3. С. 45.
2. Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. — М.: Физматлит, 2006.
3. Goebel Dan M., Katz Ira. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. JPL space science and technology series. 2008. P. 486.
4. Бугрова А. И., Десятков А. В., Лунатов А. С. и др. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 4. С. 395.
5. Blinov N.V., Gorshkov O.A., Shagayda A.A. / IEPC-2005-033.
6. Linnell J. A., Gallimore A. D. // J. Prop. and Power. 2006. V. 22. No. 6. P. 1402.
7. Hofer R. R., Jankovsky R. S., Gallimore A. D. // J. Prop. and Power. 2006. V. 22. No. 4. P. 721.
8. Daren Yu, Maojiang Song, Hong Li, et al. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. P. 113505.
9. Xu K. G., Dao H., Walker M. L. R. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. P. 103502.
10. Бугрова А. И., Бугров Г. Э., Харчевников В. К. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 7. С. 89.
11. Mazouffre S., Dudeck M., Kralkina E., et al. Supplying the discharge of a Hall effect thruster with RF power: A novel approach to enhance thruster performances / Proc. of 5th International Spacecraft Propulsion Conference, 2008.
12. Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н., Яценко Н. А. Высокочастотный емкостный разряд: Физика. Техника эксперимента. Приложения. — М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та, 1995.
13. Задириев И. И., Вавилин К. В., Гоморев М. А. и др. / 39-я Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС. 2012. С. 242.

About possibility of applying a capacitive RF discharge to the Hall ion sources and thrusters

I. I. Zadiriev¹, A. A. Rukhadze¹, E. A. Kralkina², K. V. Vavilin², and V. B. Pavlov²

¹ Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: iizadiriev@gmail.com

² M. V. Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

Received November 5, 2015

Research of ion energy distributions in a plasma flow from the toroidal chamber with a capacitive RF discharge in a radial magnetic field is presented. It is demonstrated that by the means of this discharge an ion beam average energy of 230 eV can be achieved.

PACS: 52.75.Di, 52.80.Pi

Keywords: radio frequency discharge, plasma source, closed electron drift.

REFERENCES

1. V. P. Kim, *Tech. Phys.* **85** (3), 45 (2015).
2. A. I. Morozov, *Introduction to Plasma Dynamics* (Fizmatlit, Moscow, 2006) [in Russian].
3. Dan M. Goebel and Ira Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters* (2008).
4. A. I. Bugrova, A. V. Desyatskov, A. S. Lipatov, et al., *Plasma Physics Reports* **36** (4), 395 (2010).
5. N. V. Blinov, O. A. Gorshkov, and A. A. Shagayda, IEPC-2005-033.
6. J. A. Linnell and A. D. Gallimore, *J. Prop. and Power.* **22** (6), 1402 (2006).
7. R. R. Hofer, R. S. Jankovsky, and A. D. Gallimore, *J. Prop. and Power.* **22** (4), 721 (2006).
8. Daren Yu, Maojiang Song, Hong Li, et al., *Phys. Plasmas.* **19**, 113505 (2012).
9. K. G. Xu, H. Dao, and M. L. R. Walker, *Phys. Plasmas.* **19**, 103502 (2012).
10. A. I. Bugrova, G. E. Bugrov, V. K. Kharchevnikov, et al., *Tech. Phys. Lett.* **38** (7), 89 (2012).
11. S. Mazouffre, M. Dudeck, E. Kralkina, et al., *Supplying the discharge of a Hall effect thruster with RF power: A novel approach to enhance thruster performances*. In *Proc. of 5th International Spacecraft Propulsion Conference* (2008).
12. Y. P. Raizer, M. N. Shneider, and N. A. Yatsenko, *Radio-Frequency Capacitive Discharge: Physics. Experiment Technique. Applications*. (Izd. MFTI, Moscow, 1995) [in Russian].
13. I. I. Zadiriev, K. V. Vavilin, M. A. Gomorev, et al., in *Proc. 39th International (Zvenigorod) Conference on Plasma Physics and Controlled Fusion*. (Zvenigorod, Russia, 2012). P. 242.