

УДК 537.525
 EDN: UMEGFY

PACS: 52.75.Di, 52.80.Pi

Частотная зависимость энергии ионов на выходе из емкостного ВЧ-разряда, помещенного во внешнее магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей

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

Исследована частотная зависимость энергии и тока ионов на выходе из ВЧ источника плазмы, имеющего геометрию СПД. Показано, что энергия ионов максимальна при работе на частоте 6,8 МГц. Увеличение рабочей частоты сопровождается падением энергии ионов. Ток ионов немонотонно зависит от частоты. При частотах менее 27,12 МГц рост энергии ионов сопровождается падением тока, а падение энергии ростом тока. Увеличение частоты до 27,12 МГц не приводит к росту ионного тока.

Ключевые слова: высокочастотный, электроракетный двигатель, емкостной, разряд, плазма, ионы, энергий ионов, частота.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-14-19

Введение

В настоящее время в связи с потребностями развития телекоммуникационных систем большое внимание в мире уделяется разработке новых и усовершенствованию известных электроракетных двигателей (ЭРД) с целью повышения ресурса, энергоэффективности и создания возможности работы не только на инертных газах, но и на химически активных

газах. Среди большого разнообразия электрических реактивных двигателей для космических аппаратов, в России активнее всего применяется стационарный плазменный двигатель (СПД), который ценится за простоту и надежность конструкции. Тем не менее, СПД, работающий на разряде постоянного тока (РПТ), имеет ряд недостатков. Основной подход к их устранению основан на доработке РПТ и геометрии СПД. Другой подход связан с использованием принципиально новых рабочих процессов двигателя [1]. Так, в работах [2, 3] было предложено заменить РПТ на емкостной высокочастотный разряд (ЕВЧР) или на комбинацию ЕВЧР и РПТ. Выбор такого разряда был обусловлен аналогией между РПТ и ЕВЧР, а именно наличием приэлектродных скачков потенциала, позволяющих ускорять ионы, создающих тягу двигателя.

В работах [2, 3] были изучены физические процессы в ВЧ-модификации СПД, а также получены интегральные и локальные параметры разряда в зависимости от внешних условий его поддержания. Так, было показано, что двигатель стабильно работает как на инертных газах (аргон, ксенон, криптон), так и на химически активных газах (воздух), что позволяет говорить о востребованности дан-

Швыдкий Георгий Вячеславович, вед. инженер, к.ф.-м.н.

E-mail: laggige@mail.ru

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

E-mail: viline@inbox.ru

Задириев Илья Игоревич, н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: s_333_52@mail.ru

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

E-mail: ekralkina@mail.ru

Никонов Александр Михайлович, к.ф.-м.н.

E-mail: nikonov.207@mail.ru

МГУ им. М. В. Ломоносова.

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

Статья поступила в редакцию 11.04.2024

Принята к публикации 3.05.2024

Шифр научной специальности: 1.3.9.

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

ной модификации двигателя. Было выполнено обширное исследование влияния величины магнитного поля, высокочастотной (ВЧ) мощности, расхода и рода газа, электрической схемы организации разряда и других параметров на энергию выходящих ионов, их концентрацию, импеданс разряда и распределение плотности плазмы. Было показано, что параметры двигателя сильнее всего зависят от электрической схемы организации ЕВЧР. В частности, в случае, когда нагруженный и заземленный (корпус двигателя) электроды разомкнуты по постоянному току, энергия ионов составляла 70 эВ, в случае замыкания электродов по постоянному току она возрастала до 260 эВ, а при добавлении в цепь источника постоянного напряжения энергия ионов могла составлять величину порядка 400 эВ. В работах [2, 3] большинство измерений были проведены на частоте ВЧ-генератора 13,56 МГц. Частота является одним из фундаментальных параметров ВЧ-разряда, в связи с этим в данной работе изучено влияние рабочей частоты (2–27,12 МГц) на энергию и плотность ионного потока на выходе из источника плазмы. Исследования были выполнены только с использованием замкнутой по постоянному току электрической цепи, т. к. такая организация разряда показала наилучшие результаты по тяге и эффективности двигателя.

Схема и методика экспериментов

Для исследования параметров двигателя в зависимости от частоты также, как в работах [2, 3] использовалась модель СПД-70, с внешним диаметром разрядного канала 70 мм. Схема источника плазмы показана на рисунке 1. В отличие от классической модели СПД на разряде постоянного тока, на нагруженный электрод подавалось ВЧ-напряжение, поступающее от ВЧ-генератора через систему согласования. В качестве заземленного электрода использовались стенки вакуумной камеры и корпус двигателя. Чтобы обеспечить замыкание электродов по постоянному току, они соединялись с помощью дросселя – индуктивности большой величины (см. рис. 1).

Источник плазмы помещался в вакуумную камеру объемом 0,8 м³, которая откачивалась каскадом из двух вакуумных насосов

до давления 3×10^{-5} Торр. При этом, во время работы двигателя давление в камере не поднималось выше 9×10^{-4} Торр. В качестве рабочего газа использовался аргон. Величина радиального магнитного поля составляла 210 Гс. Мощность ВЧ-генератора варьировалась в диапазоне 100–300 Вт. В работе рассматриваются 5 частот генератора: 2; 4; 6,8; 13,56 и 27,12 МГц.

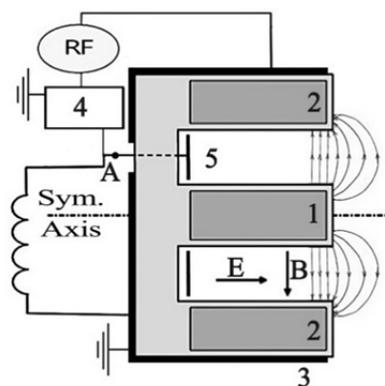


Рис. 1. Схема подключения ЕВЧР. 1, 2 – внутренняя и внешние катушки магнитов; 3 – заземленный корпус; 4 – система согласования; 5 – нагруженный электрод

Измерение энергии ионов на выходе из плазменного канала производилось с помощью четырехсеточного энергоанализатора [2], который располагался в вакуумной камере напротив двигателя на отдалении 20 см от него. На таком расстоянии энергоанализатор уже не вносит возмущения в разряд, при этом коллекторный ток остается достаточно большим, чтобы его легко можно было выделить на фоне шумов. Конструкция энергоанализатора представляет собой 4 сетки и коллектор. Первая, внешняя сетка находится под потенциалом земли, чтобы исключить влияние полей внутри энергоанализатора на разряд двигателя. Следующая сетка имеет относительно небольшое отрицательное напряжение (-30 В), чтобы исключить попадание внешних электронов. На третью сетку подается задерживающий ионы положительный потенциал с источника постоянного напряжения в диапазоне 0–500 В. Четвертая сетка, также, как и вторая, имеет небольшой отрицательный потенциал (-30 В) для возврата электронов, вызванных вторичной ион-электронной эмиссией с коллектора. Средняя энергия ионного потока определялась на основании кривой, получен-

ной дифференцированием коллекторного тока по задерживающему напряжению.

Результаты измерений

Результаты измерений средней энергии ионов E и постоянного тока I_{dc} , текущего между электродами, в зависимости от рабочей частоты показаны на рисунках 2 и 3.

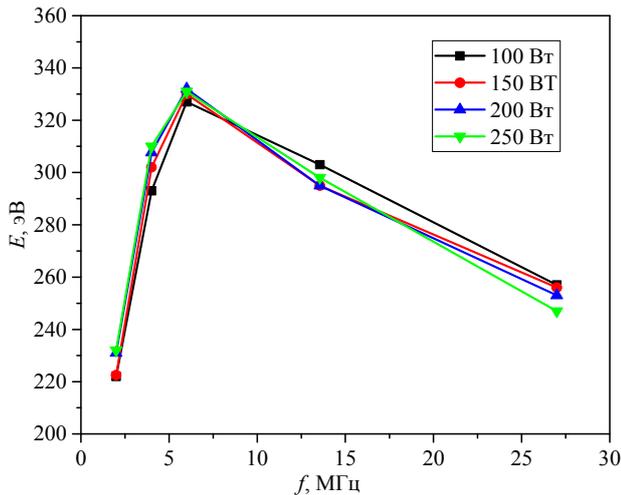


Рис. 2. Зависимость энергии ионов на выходе из ВЧ СПД от рабочей частоты

Измерения показали, что энергия ионов немонотонно зависит от рабочей частоты. В области частот 2–6,8 МГц наблюдается рост энергии ионов от 220 до 340 эВ, затем наблюдается падение E вплоть до 250 эВ. Необходимо отметить, что в пределах погрешности эксперимента средняя энергия ионов не зависела от мощности ВЧ-генератора.

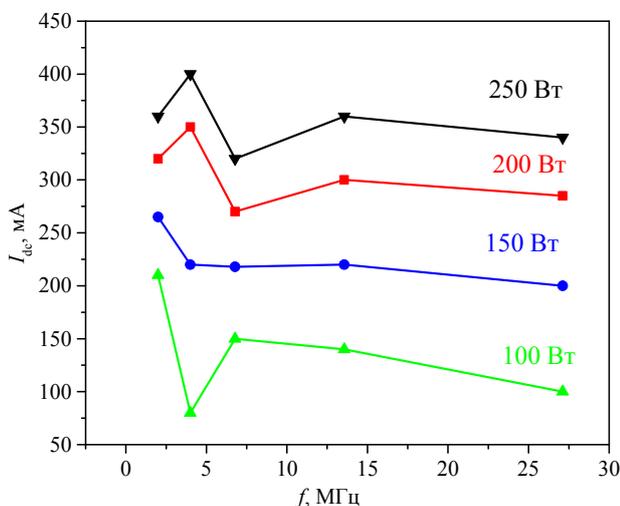


Рис. 3. Зависимость постоянного тока, текущего между электродами, от рабочей частоты

Зависимость постоянного тока, текущего между электродами, от рабочей частоты является более сложной. При малой мощности ВЧ-генератора (100 Вт) рост частоты от 2 до 4 МГц сопровождается понижением тока, затем при переходе к $f = 6,8$ МГц следует скачкообразное увеличение I_{dc} , далее ток слабо падает при увеличении частоты. При мощности 150 Вт ток падает при переходе от 2 до 4 МГц, далее в области 4–27 МГц величина тока между электродами практически не изменяется. При более высоких мощностях ВЧ-генератора значения I_{dc} достигают максимума при 4 МГц, далее при $f = 6,8$ МГц наблюдается минимум тока, который сменяется ростом I_{dc} и выходом на плато. Необходимо отметить, что с ростом ВЧ-мощности положение основного максимума тока постепенно смещается в область больших частот. Так, на мощности 100 Вт максимум лежит на частотах, менее 2 МГц, в то время как на мощности 250 Вт максимум располагается в районе 4 МГц.

Обсуждение результатов

В работе [4] по исследованию плазменного конденсатора для случаев низких рабочих частот ω , много меньших электронной ленгмюровской частоты ω_{Le} , показано, что при частоте поля меньшей или равной ионной ленгмюровской частоте ω_{Li} ($\omega \leq \omega_{Li}$) импеданс плазмы соизмерим с импедансом слоев, следовательно, значительная часть ВЧ-поля падает между слоями – в области, заполненной плазмой. При увеличении частоты и достижении соотношения ($\omega \gg \omega_{Li}$), импеданс плазмы становится пренебрежительно мал по сравнению с импедансом слоев, поэтому именно на них приходится падение ВЧ-поля, что соответствует максимальному значению падения потенциала в слое, который определяет энергию ионов на выходе из источника плазмы.

Для области рабочих частот $\omega \gg \omega_{Li}$, когда приэлектродный слой сформирован, В. Годяком [5] получено выражение,

$$P_i / P_e = (\omega_{Le} / \omega)^2 3U_b / (2d\nu_m), \quad (1)$$

связывающее долю мощности, поглощаемую ионами P_i и электронами P_e с частотами ω_{Le} и ω ,

скоростью Бома U_B , половиной продольного размера источника плазмы d и частотой электрон-атомных столкновений ν_m . Формула (1) получена в предположении постоянства мощности ВЧ-генератора для случая ЕВЧР с разомкнутыми по постоянному току электродами. Из формулы (1) следует, что с ростом частоты наблюдается рост P_e по сравнению с P_i . Это приводит к понижению падения потенциала в слое [6].

Оценим характерные значения ионной и электронной ленгмюровской частот при условиях настоящих экспериментов. Для этого, прежде всего, вспомним, как связан ток, текущий между электродами, с током ионов на выходе из источника плазмы.

Для ВЧ емкостного разряда с замкнутыми по постоянному току электродами характерен так называемый батарейный эффект [4, 7]. В любом ВЧ емкостном разряде в пределах периода плазма изменяет свое положение – колеблется, попеременно касаясь одного или другого электрода. Рассмотренный в настоящей работе разряд сильно ассиметричен, т.к. площадь нагруженного электрода существенно ниже площади заземленного электрода. В случае, когда электроды замкнуты, а площадь электродов сильно различается (ассиметричный разряд), плазма никогда не касается электрода большей площади. На него в течение всего периода идет ионный ток, пропорциональный плотности плазмы вблизи электрода. На электрод меньшей площади идет как ионный ток, так и электронный ток, который с превышением компенсирует ионный ток в момент касания плазмы и электрода. При этом во внешней цепи течет ток I_{dc} от электрода большей площади к электроду меньшей площади. Вблизи малого электрода и в плазме ток переносится электронами, а вблизи электрода большей площади – ионами. Это означает, что ток I_{dc} равен току ионов i_+ , покидающих канал источника плазмы.

Оценим концентрацию плазмы n_e в канале источника плазмы. Это можно сделать, используя формулу Бома:

$$i_+ = 0,4 \sqrt{\frac{2kT_e}{M}} n_i S$$

на основании известных температуры электронов T_e , массы ионов M , тока ионов $i_+ = I_{dc}$ и

площади сечения канала источника плазмы S . Принимая, что температура электронов составляет величину порядка 20 эВ, получим следующее выражение для n_e :

$$n_e [\text{см}^{-3}] \sim 5 \times 10^{11} \times I_{dc} [\text{A}].$$

Таким образом, при рассмотренных условиях экспериментов концентрация плазмы изменяется от $0,5$ до $2,5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Зависимость ионной ленгмюровской частоты от концентрации плазмы в указанном выше диапазоне концентраций плазмы показана на рисунке 4. Как видно, условие $\omega \gg \omega_{Li}$, в полной мере выполняется только для частоты 27,12 МГц. Однако, при всех рассмотренных условиях экспериментов максимум энергии ионов наблюдается при частоте 6,8 МГц. Это, по-видимому, связано с тем, что при более высоких частотах подавляющая часть мощности ВЧ-генератора идет на нагрев электронов.

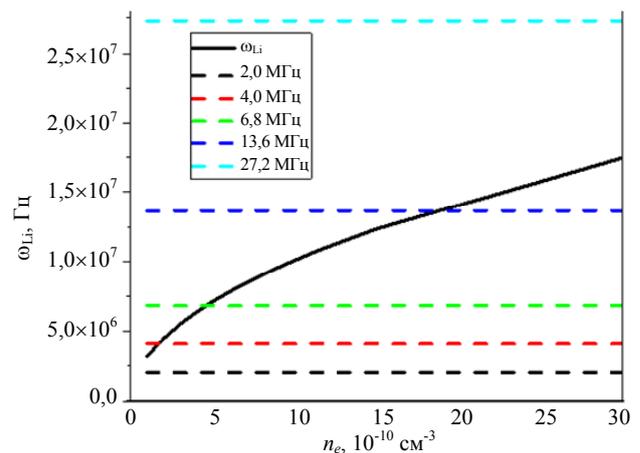


Рис. 4. Зависимость ионной ленгмюровской частоты от концентрации плазмы

В случае, когда значительная часть ВЧ-мощность идет на нагрев ионов в приэлектродных слоях пространственного заряда, при постоянстве вкладываемой в разряд ВЧ-мощности значения i_+ и E должны слабо изменяться при изменении частоты. Эффект реализуется при мощностях ВЧ-генератора 200 Вт и выше и частотах, менее 27,12 МГц. Рост энергии ионов сопровождается падением величины ионного тока и наоборот. Указанная зависимость нивелируется при увеличении частоты до 27,12 МГц. Это может быть связано, как с ростом нагрева электронов, так и с потерями ВЧ-мощности в системе согласования.

Заключение

В работе рассмотрена частотная зависимость (в диапазоне 2–27,12 МГц) энергии и тока ионов в ВЧ источнике плазмы, имеющем геометрию СПД. Показано, что энергия ионов достигает максимальных значений при частоте 6,8 МГц. В области частот, меньших 6,8 МГц, энергия ионов падает, т. к. рабочая частота оказывается менее ионной ленгмюровской. При частотах, больших 6,8 МГц, энергия ионов падает, т. к. увеличивается доля ВЧ-мощности, поглощаемой электронами, по сравнению мощностью, идущей на ускорение ионов в приэлектродных слоях. В случае, когда значительная часть ВЧ-мощность идет на нагрев ионов с приэлектродных слоев пространственного заряда, при постоянстве вкладываемой в разряд ВЧ-мощности значения i_+ и E должны слабо изменяться при изменении частоты. Эффект реализуется при мощностях ВЧ-генератора 200 Вт и выше и частотах, менее 27,12 МГц. Рост энергии ионов сопровождается падением величины ионного тока и наоборот. Указанная зависимость нивелируется при увеличении частоты до 27,12 МГц. Это может быть связано, как с ростом нагрева электронов, так и с потерями ВЧ-мощности в системе согласования.

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

Исследование выполнялось с использованием оборудования, приобретённого МГУ 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».

ЛИТЕРАТУРА

1. *Diamant K.* A 2-stage cylindrical hall thruster for air breathing electric propulsion. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010, p. 6522.
2. *Shvydkiy G. V., Zadiriev I. I., Kralkina E. A., Vavilin K. V.* / Vacuum. 2020. Vol. 180. P. 109588.
3. *Швыдкий Г. В., Задириев И. И., Кралькина Е. А., Вавилин К. В.* / Прикладная физика. 2021. № 1. С. 24–30.
4. *Савинов В. П.* Физика высокочастотного емкостного разряда. – М.: Физмалит, 2013.
5. *Godyak V. A.* Soviet Radio Frequency Discharge Research, Falls Church, VA: Delphic Associates, 1986.
6. *Xi-Ming Zhu, Wen-Cong Chen et al.* / J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. P. 7019–7023.
7. *Upadhyay J., Peshl J., Popović S., Valente-Feliciano A.-M., Vušković L.* / AIP Advances. 2018. Vol. 8. P. 085008.

PACS: 52.75.Di, 52.80.Pi

Frequency dependence of ion energy at the outlet of a capacitive RF discharge placed in an external magnetic field with a predominant radial component

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

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

Received 11.04.2024; accepted 3.05.2024

In this article, the frequency dependence of the energy and current of ions at the output of an RF plasma source with SPT geometry has been investigated. It has been shown that the ion energy is maximal when operating at a frequency of 6.8 MHz. An increase in operating frequency is accompanied by a decrease in ion energy. The ion current depends nonmonotonical-

ly on frequency. At frequencies less than 27.12 MHz, an increase in ion energy is accompanied by a decrease in current, and a decrease in energy by an increase in current. Increasing the frequency to 27.12 MHz does not lead to an increase in the ion current.

Keywords: high-frequency, electric rocket thruster, capacitive, discharge, plasma, ions, ion energy, frequency.

REFERENCES

1. Diamant K., A 2-stage cylindrical hall thruster for air breathing electric propulsion. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010, p. 6522.
2. Shvydkiy G. V., Zadiriev I. I., Kralkina E. A. and Vavilin K. V., Vacuum **180**, 109588 (2020).
3. Shvydkiy G. V., Zadiriev I. I., Kralkina E. A. and Vavilin K. V., Plasma Physics Reports. **47** (10), 1075 (2021).
4. Savinov V. P., Physics of high-frequency capacitive discharge. Moscow, Fizmalit, 2013.
5. Godyak V. A. Soviet Radio Frequency Discharge Research, Falls Church, VA: Delphic Associates, 1986.
6. Xi-Ming Zhu, Wen-Cong Chen et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **40**, 7019–7023 (2007).
7. Upadhyay J., Peshl J., Popović S., Valente-Feliciano A.-M. and Vušković L., AIP Advances **8** (8), 085008 (2018).