

Характеристики емкостного высокочастотного разряда в магнитном поле с преимущественной радиальной составляющей

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

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119991 Москва, Россия
e-mail: ekralkina@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 марта 2023 г.

В окончательной редакции 16 мая 2023 г.

Принято к публикации 22 мая 2023 г.

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик высокочастотного (ВЧ) емкостного разряда, помещенного в магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей. Эксперименты выполнены в источнике плазмы, имеющем геометрию стационарного плазменного двигателя. Интегральные характеристики разряда, а также аксиальное распределение зондового ионного тока насыщения в канале источника плазмы измерены при трех схемах организации внешней цепи разряда: с разомкнутыми и замкнутыми по постоянному току электродами, а также в комбинации емкостного разряда с разрядом постоянного тока. Основные измерения выполнены в аргоне в диапазоне расходов $0.75\text{--}1.8\text{ mg/s}$ и мощностей ВЧ генератора $80\text{--}300\text{ W}$ при частотах 2, 4 и 13.56 МГц при индукции магнитного поля, лежащего в диапазоне $100\text{--}300\text{ G}$. Выполнены оценки параметров плазменного двигателя на основе емкостного ВЧ разряда при работе на воздухе, аргоне и криптоне.

Ключевые слова: емкостной высокочастотный разряд, вольт-амперная характеристика, ток смещения, ток проводимости.

DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55973.51-23

Введение

Одной из новых актуальных задач, стоящих перед космической отраслью, является организация полетов космических аппаратов на сверхнизких околоземных орбитах ($\sim 200\text{ km}$) [1–4]. Наличие остаточной атмосферы на высотах порядка 200 km требует оснащения космических аппаратов двигателями, способными длительно работать не только на инертных газах, но и на их смесях с воздухом, а в идеале — исключительно на воздухе. В качестве естественного кандидата на рабочий процесс таких двигателей выступает высокочастотный (ВЧ) разряд. Одним из перспективных направлений использования ВЧ разряда в космической технике является замена рабочего процесса стационарного плазменного двигателя (СПД) на основе разряда постоянного тока на емкостной ВЧ разряд (ЕВЧР) [5–9]. Возможность замены обусловлена следующими фактами: так же как в разряде постоянного тока, в ЕВЧР рядом с электродами возникают скачки квазистационарного потенциала, которые при наличии квазирadiaльного магнитного поля должны приводить к появлению азимутального дрейфа электронов и ускорению ионов [7].

Возможность замены разряда постоянного тока (РПТ) на ЕВЧР, а также на комбинацию РПТ с ЕВЧР в источниках плазмы, имеющих геометрию СПД, была рассмотрена ранее в работах [5–9]. Показано, что ЕВЧР легко поджигается и горит как в инертных, так и в химически активных газах, не требуя наличия эмитирующего электроны катода. Свойства разряда существенно

зависят от схемы его внешней цепи. При использовании схемы организации ЕВЧР с разомкнутыми по постоянному току электродами последние могут быть вынесены за пределы разрядного промежутка, что сводит к минимуму эрозию электродов за счет взаимодействия их материала с химически активными частицами. Кроме того, потоки электронов и ионов, поступающих на электроды, скомпенсированы по величине в пределах периода ВЧ поля. Это свойство разряда может позволить отказаться от использования нейтрализатора. Однако, как показано в [6,8], в случае применения схемы ЕВЧР с разомкнутыми по постоянному току электродами не удается получить поток ионов с энергией, превышающей 70 eV . Существенного увеличения энергии ионов удается достичь при замыкании электродов по постоянному току, однако в этом случае потоки электронов и ионов на выходе из канала оказываются нескомпенсированными. Дополнительное увеличение энергии и величины потока ионов удается получить при использовании комбинации ЕВЧР с РПТ [6].

Ранее все измерения, представленные в [5–9], были выполнены при работе на частоте 13.56 МГц. В настоящей работе изучены параметры разряда в источнике плазмы, имеющем геометрию СПД, при изменении рабочей частоты и индукции внешнего магнитного поля.

1. Схема и методика экспериментов

В экспериментальных исследованиях использовался источник плазмы, выполненный в геометрии стационар-

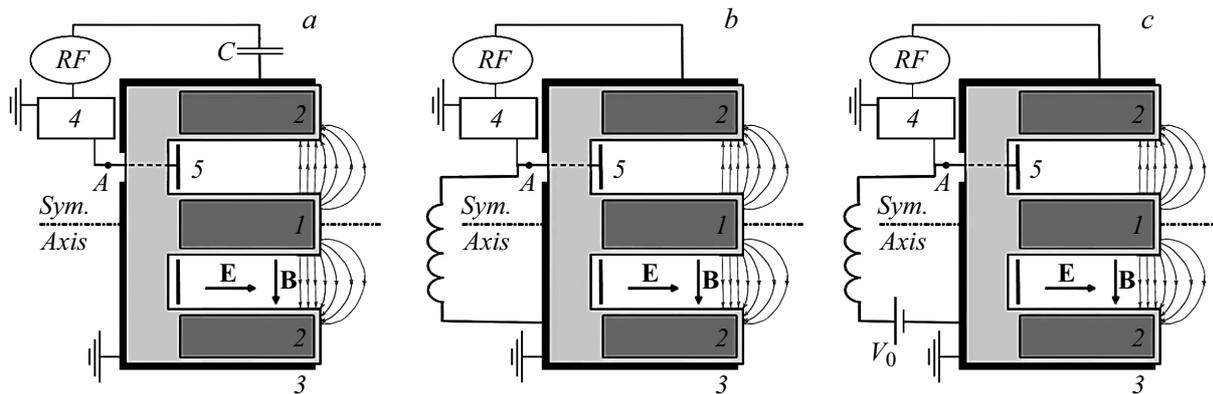


Рис. 1. Схемы подключения ЕВЧР: *a* — с разделительной емкостью, *b* — с замыканием по постоянному току, *c* — комбинация емкостного разряд с разрядом постоянного тока. 1, 2 — внутренние и внешние катушки магнитов, 3 — заземленный корпус, 4 — система согласования, 5 — нагруженный электрод, *C* — разделительная емкость.

ного плазменного двигателя (СПД) диаметром 70 mm. Схема организации магнитопроводов и катушек осталась неизменной, за исключением отключения катушек магнитов от разрядной цепи и подсоединения их к внешнему источнику питания.

Лабораторный источник ионов монтировался на фланце вакуумной камеры объемом порядка 0.8 m^3 , при этом корпус источника заземлялся. Вакуумная камера откачивалась каскадом из двух насосов — форвакуумного и турбомолекулярного до давления $3 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$, во время горения разряда давление изменялось в диапазоне от $8 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}$ в зависимости от условий эксперимента. Основным рабочим газом являлся аргон, однако ряд экспериментов проводился с криптоном и воздухом.

Активный электрод, расположенный в глубине канала на месте анода в стандартной схеме СПД, подключался к внешнему ВЧ генератору через систему согласования тремя способами: с размыканием цепи по постоянному току, с замыканием цепи по постоянному току и с подачей дополнительного постоянного напряжения на нагруженный электрод. Третий способ представляет собой комбинацию ЕВЧР и разряда постоянного тока (РПТ). Соответствующие схемы представлены на рис. 1. В первом случае активный и заземленный электрод были разделены по постоянному току с помощью разделительной емкости *C*, равной 1500 pF. Для реализации второго способа подключения между электродами подсоединялся дроссель — спираль с высокой индуктивностью, которая позволяла протекать постоянному току. Для третьей схемы последовательно во внешнюю цепь включался источник постоянного напряжения, т.е. использовался комбинированный ЕВЧР и РПТ. Использовались ВЧ генераторы с частотой 2, 4 и 13.56 MHz, диапазон рассмотренных мощностей составлял 90–300 W. В большинстве случаев отраженная мощность ВЧ генератора не превышала 15 W.

В настоящей работе изучались вольт-амперные характеристики (ВАХ) разряда. ВЧ напряжение между

активным электродом и землей измерялось с помощью двухканального осциллографа Tektronix TDS 1012B и емкостного делителя. Разрядный ток измерялся с помощью пояса Роговского [10], который располагался между активным электродом и системой согласования. Перед началом экспериментов пояс Роговского был откалиброван для каждой рассмотренной рабочей частоты. Значения с осциллографа усреднялись по 64 измерениям, что существенно уменьшало случайную погрешность. В связи с этим основную неточность в измерения вносили систематические погрешности, а именно неточность определения коэффициента делителя, калибровочного коэффициента пояса Роговского и влияние паразитных емкостей.

В схеме с разомкнутыми электродами измерялось постоянное смещение нагруженного электрода. Для этого к нагруженному электроду подключался резистивный делитель с коэффициентом деления 1/500. Сигнал с делителя поступал на канал осциллографа, с помощью которого и определялась постоянная составляющая напряжения.

В схеме же с замкнутыми электродами появляется возможность измерять ток, текущий между активным электродом и землей. Для того, чтобы его измерить, последовательно в разрядную цепь подключался аналоговый амперметр.

Для исследования энергии ионов на выходе из источника плазмы использовался четырехсеточный энергоанализатор [8,11]. Энергоанализатор располагался в вакуумной камере непосредственно напротив разрядного канала на расстоянии 20 cm от него. На таком расстоянии ток на коллектор был достаточно большим, чтобы выделить его на фоне шумов, однако энергоанализатор находился достаточно далеко, чтобы не вносить возмущение в разряд. Энергоанализатор состоит из четырех сеток: первая сетка была заземлена, чтобы поля внутри измерителя не выходили наружу и не влияли на разряд, вторая и четвертая сетки были под небольшим отрицательным напряжением ($\sim -30 \text{ V}$) для отталкивания внешних

электронов и электронов, вызванных вторичной ион-электронной эмиссией с коллектора, а на третью сетку подавался задерживающий ионы положительный потенциал с источника постоянного напряжения в диапазоне 0–500 В. Средняя энергия ионного потока определялась на основании кривой, полученной дифференцированием коллекторного тока по задерживающему напряжению.

Для определения ионного тока насыщения вдоль разрядного канала использовался цилиндрический зонд Ленгмюра диаметром 0.3 мм и длиной 4 мм, расположенный на передвижной каретке, которая давала возможность перемещать зонд вдоль канала. Использовалась стандартная зондовая электрическая схема. Для повышения импеданса цепи на основной частоте и второй гармонике последовательно с зондом включались два режекторных фильтра, состоящих из LC-звеньев. Подаваемое на зонд напряжение снималось с первого канала осциллографа через делитель напряжения, а для определения ионного тока использовалось сопротивление известной величины, падение напряжения на котором измерялось на втором канале осциллографа. Параллельно сопротивлению подключалась емкость большого номинала с целью снижения величины ВЧ шума.

Эксперименты были выполнены при следующих условиях: подаваемая мощность ВЧ генератора составляла 90–300 Вт, рабочие частоты генератора — 2, 4 и 13.56 МГц. Рабочие газы — аргон (расход 0.75–1.8 мг/с), криптон (1.6 мг/с), воздух (1.5 мг/с). Величина магнитного поля во всех экспериментах была одинаковой и составляла 210 Г. Величина постоянного напряжения менялась в диапазоне 0–300 В.

2. Результаты экспериментов

2.1. ВАХ разряда

Эксперименты показали, что при использовании первой схемы разряда с разомкнутыми по постоянному току электродами зависимость напряжения $U_{RF}(t)$ и тока $I_{RF}(t)$ от времени с хорошей степенью точности является гармонической. В случае использования второй и третьей схем организации разряда, когда электроды замкнуты по постоянному току, зависимости $U_{RF}(t)$, $I_{RF}(t)$ являются более сложными. Фурье-анализ показал, что в спектре $I_{RF}(t)$ присутствуют первая, вторая и третья гармоники, последняя из которых составляет менее 10% от первой, в то время как напряжение в основном представлено первой и в меньшей степени (50% от первой) третьей гармоникой. В дальнейшем для рассмотрения ВАХ использовались первые гармоники ВЧ тока и напряжения, которые вносят наибольший вклад в поглощение ВЧ мощности.

На рис. 2 показаны зависимости амплитуды первой гармоники ВЧ тока от амплитуды ВЧ напряжения U_{RF} , приложенного к электродам источника плазмы. Измерения были выполнены при работе на частоте 4 МГц с использованием трех схем организации разряда.

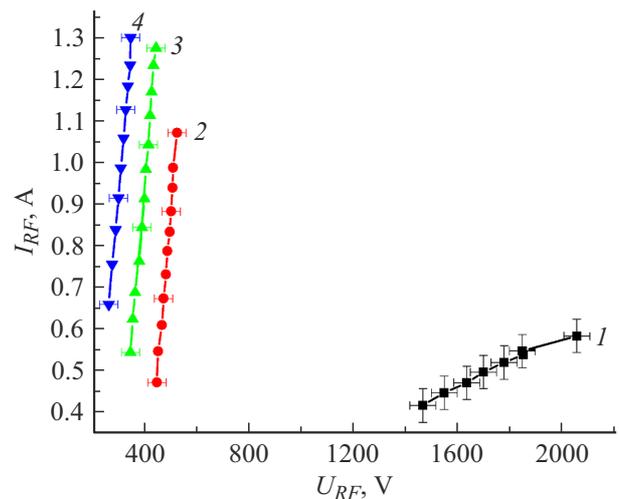


Рис. 2. ВАХ разряда для трех схем подключения разряда. $B = 210$ Г. Рабочая частота — 4 МГц, газ — аргон. 1 — разомкнутая схема, 2 — замкнутая схема, 3 — подача 100 В постоянного напряжения, 4 — подача 200 В постоянного напряжения.

Для реализации разряда в заданном диапазоне мощностей ВЧ генератора требуются наибольшие значения ВЧ напряжения U_{RF} при использовании схемы с разомкнутыми по постоянному току электродами. Сдвиг фаз между ВЧ током и напряжением близок к -90 градусам, что указывает на подавляющий вклад тока смещения в I_{RF} . При замыкании электродов по постоянному току напряжение горения разряда уменьшается, а ВЧ ток растет. Так, амплитудные значения напряжения лежат в диапазоне 400–500 В, а значения тока — в диапазоне 0.3–1.1 А. Увеличение I_{RF} при увеличении мощности ВЧ генератора происходит практически при постоянном напряжении между электродами подобно тому, как это происходит в разряде постоянного тока при нормальном режиме его горения. Сдвиг фаз $\delta\varphi$ между $U_{RF}(t)$ и $I_{RF}(t)$ лежит в диапазоне -40 – -30° , что существенно выше, чем в случае использования первой схемы. Таким образом, при переходе к схеме с замкнутыми по постоянному току электродами уменьшается доля тока смещения и повышается доля тока проводимости в полном токе.

При подаче положительного относительно земли потенциала с помощью источника питания постоянного тока (рис. 1, с) на нагруженный электрод наблюдается существенное падение рабочего напряжения и рост ВЧ тока. Обращает на себя внимание, что сдвиг фаз между ВЧ током и напряжением близок к 30° .

В работе [12] было показано, что при подаче отрицательного относительно земли потенциала на нагруженный электрод ВАХ разряда занимают промежуточное положение между ВАХ, измеренных при разомкнутых и замкнутых по постоянному току электродах.

Измерения, выполненные при частотах 2 и 13.56 МГц [12], показали, что качественно зависимость

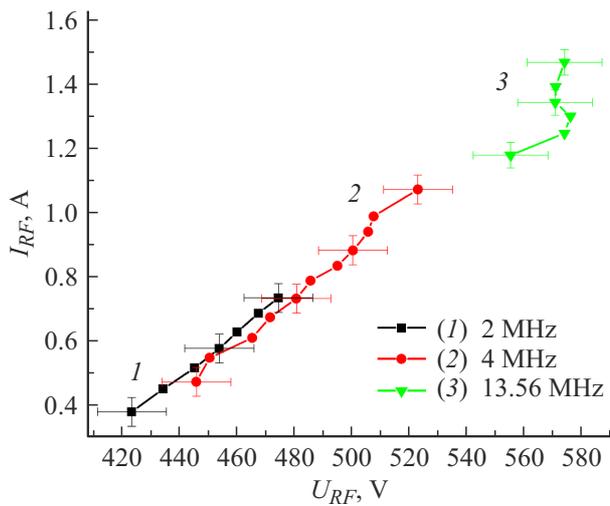


Рис. 3. ВАХ разряда для случая разряда с замкнутыми по постоянному току электродами. $B = 210$ G. Рабочая частота 2 (1), 4 (2), 13.56 MHz (3).

ВАХ разряда от схемы его организации аналогична полученной при $f = 4$ MHz.

Рассмотрим более подробно зависимости $I_{RF}(U_{RF})$, измеренные при работе на частотах 2, 4 и 13.56 MHz, со схемой с замкнутыми по постоянному току электродами. Результаты экспериментов представлены на рис. 3.

Обращает на себя внимание, что характер зависимости $I_{RF}(U_{RF})$, измеренной при $f = 2, 4$ MHz, отличается от характера кривой для $f = 13.56$ MHz. Если при работе на частоте 13.56 MHz вид ВАХ близок к наблюдаемому при нормальном режиме горения разряда постоянного тока, то при меньших частотах для увеличения ВЧ тока требуется увеличение ВЧ напряжения, что может свидетельствовать о реализации режима, близкого к аномальному режиму горения тлеющего

разряда. По мере уменьшения рабочей частоты абсолютная величина сдвига фаз уменьшается и приближается к 20° , что свидетельствует о повышении вклада тока проводимости в полный ток I_{RF} . Напомним, что настоящие эксперименты при трех рассмотренных частотах выполнялись в одинаковом, фиксированном диапазоне мощностей ВЧ генератора. При этом рост активного тока с необходимостью сопровождается уменьшением значений напряжения горения разряда U_{RF} , что и наблюдалось в эксперименте.

Рассмотрим далее, как влияет индукция внешнего магнитного поля на вид ВАХ. На рис. 4а показаны зависимости амплитуды ВЧ тока I_{RF} от напряжения между электродами U_{RF} для случая, когда электроды замкнуты по постоянному току.

Из рисунка видно, что при малых значениях B разряд поджигается в α -моду. По мере роста U_{RF} разряд переходит в γ -моду. При этом напряжение горения сначала уменьшается, и дальнейший рост тока происходит при увеличении ВЧ напряжения между электродами. Одновременно начинает увеличиваться разность фаз в диапазоне $-70^\circ - -55^\circ$, указывая на повышение роли тока проводимости. Начиная с $B = 105$ G, α -мода разряда при рассмотренных мощностях ВЧ генератора не наблюдается, и ВЧ ток резко растет при увеличении U_{RF} при всех рассмотренных P_{gen} . Начиная с $B = 140$ G, значения I_{RF} слабо зависят от величины магнитного поля.

2.2. Самосмещение нагруженного электрода и постоянный ток, текущий во внешней цепи

В рассмотренном источнике плазмы ЕВЧР является сильно ассиметричным, так как площадь нагруженного электрода существенно меньше площади заземленного электрода. Как следствие, в схеме с разомкнутыми по постоянному току электродами квазистационарное

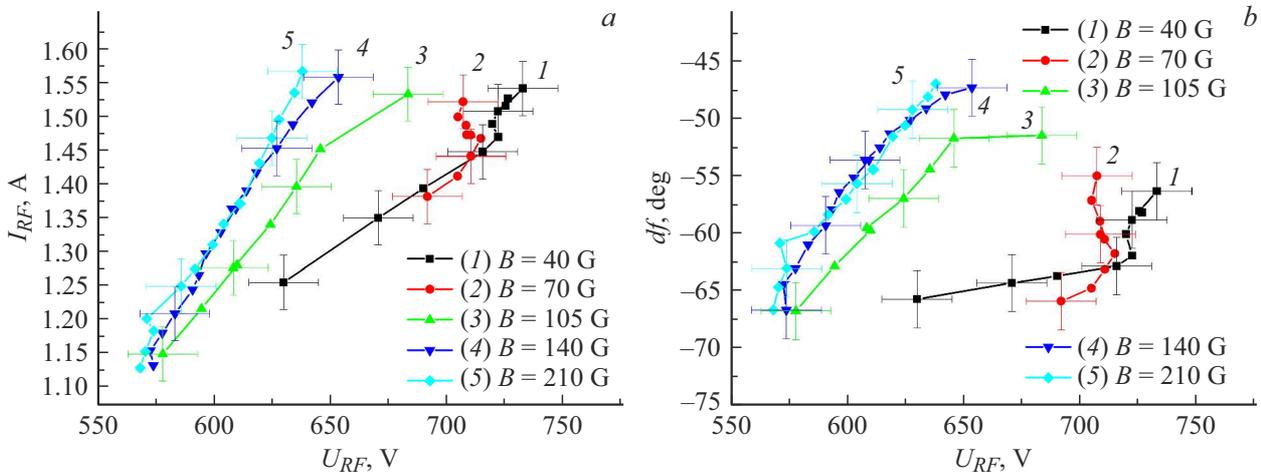


Рис. 4. ВАХ разряда (а) и сдвиг фаз между ВЧ током и напряжением (б) при различных значениях индукции внешнего магнитного поля. Случай замкнутых по постоянному току электродов. Рабочая частота 13.56 MHz, газ — аргон.

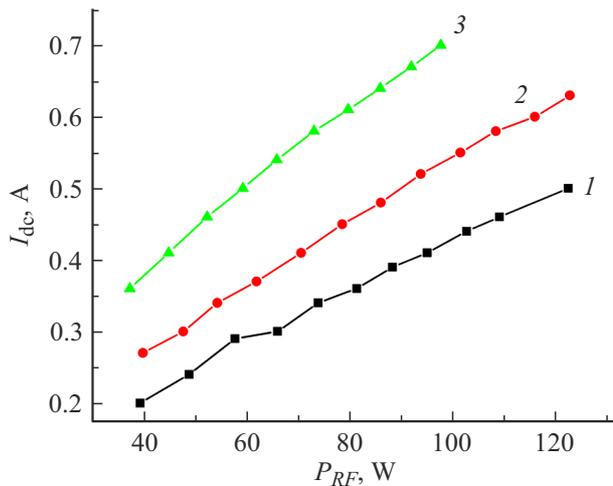


Рис. 5. Зависимость постоянного тока от вложенной ВЧ мощности для замкнутого случая при $V_{dx} = 0$ (1), 100 (2) и 200 В (3), $f = 4$ МГц.

падение потенциала в слое у нагруженного электрода существенно превышает падение потенциала в слое у заземленного [13–16], при этом возникает постоянное отрицательное самосмещение нагруженного электрода U_a [8,13,14]. В настоящих экспериментах абсолютная величина U_a увеличивалась пропорционально амплитуде ВЧ напряжения, и при работе на частоте 13.56 МГц изменялась в диапазоне 600–740 В.

При использовании схемы с замкнутыми электродами постоянное смещение активного электрода исчезает, а во внешней цепи разряда начинает течь постоянный ток I_{dc} . На рис. 5 приведены зависимости I_{dc} от мощности ВЧ генератора, измеренные при использовании второй и третьей схем организации ЕВЧР. Отметим, что по оси абсцисс на графике для большей наглядности отложена мощность ВЧ генератора P_{RF} , а не ВЧ напряжение, так как изменение I_{dc} происходит практически при постоянном U_{RF} . Как видно, с увеличением мощности ВЧ генератора и дополнительного постоянного потенциала V_{dc} , подаваемого на нагруженный электрод, наблюдается рост тока I_{dc} .

Измерения показали, что увеличение рабочей частоты сопровождается слабым падением абсолютной величины постоянного тока I_{dc} . Так, при переходе от частоты 2 МГц на частоту 13.56 МГц в среднем наблюдается падение постоянного тока на 60 мА.

При магнитных полях более 140 Г при всех рассмотренных рабочих частотах абсолютные значения тока I_{dc} совпадали в пределах экспериментальных ошибок.

2.3. Аксиальное распределение ионного зондового тока в канале источника плазмы

На рис. 6 представлено распределение ионного зондового тока насыщения $i+$ вдоль разрядного канала и

в струе, истекающей из него плазмы для замкнутой и разомкнутой схем. При использовании схемы разряда с разомкнутыми по постоянному току электродами (рис. 6, а) зависимость $i+(l)$ является немонотонной, а именно наблюдаются два максимума ионного тока, расположенных вблизи нагруженного электрода и вблизи среза канала. Стоит уточнить, что приведенные погрешности являются систематическими и не влияют на относительное расположение экспериментальных точек на одной кривой.

При замыкании электродов по постоянному току характер распределения $i+(l)$ существенно изменяется (рис. 6, б): локальный максимум ионного тока у нагруженного электрода пропадает, а максимум $i+$ в области среза канала существенно возрастает. Кроме того, абсолютные значения зондового ионного тока насыщения существенно возрастают.

Эксперименты, выполненные в [12], показали, что подача V_{dc} на нагруженный электрод сопровождается дополнительным ростом ионного тока вблизи среза канала.

Как при использовании схемы с разомкнутыми по постоянному току электродами, так и при их замыкании, при увеличении мощности ВЧ генератора значения $i+(l)$ возрастают на всем измеряемом участке.

Величина внешнего радиального магнитного поля слабо влияет на распределение ионного тока в канале источника плазмы при $B > 140$ Г. Полученный результат коррелирует со слабой зависимостью ВАХ разряда от B .

2.4. Энергия ионов

Ранее в работах [6,8] было показано, что энергия ионов E при использовании схемы с разомкнутыми по постоянному току электродами не превышает 70 эВ. При использовании схемы с замкнутыми электродами энергия ионов существенно увеличивается. Эксперименты показали, что наибольшие значения наблюдаются при рабочей частоте 13.56 МГц, наименьшие — при работе на частоте 2 МГц. Так, при увеличении частоты от 2 до 13.56 МГц рост E составляет величину порядка 100 эВ. Также рост положительного смещения нагруженного электрода сопровождается увеличением энергии ионов.

Средняя энергия ионов слабо зависит от индукции магнитного поля: в диапазоне 120–220 Г она уменьшается на величину порядка 10%. Данная тенденция связана с уменьшением амплитуды ВЧ напряжения U_{RF} , что, в свою очередь, уменьшает потенциал плазмы и энергию ионов.

3. Характеристики двигателя на основе емкостного ВЧ разряда с радиальным магнитным полем

Для того чтобы получить представление о перспективности использования источника плазмы, работающего

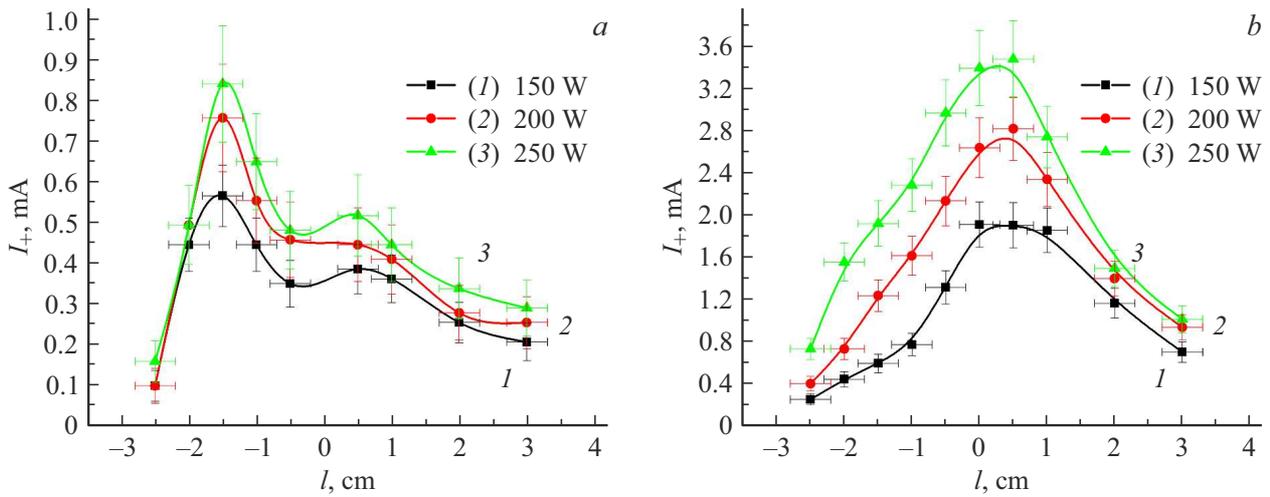


Рис. 6. Распределение ионного тока насыщения вдоль разрядного канала для разных мощностей ВЧ генератора: *a* — разомкнутая схема, *b* — замкнутая схема. Частота генератора — 13.56 MHz, $B = 280$ G, газ — аргон.

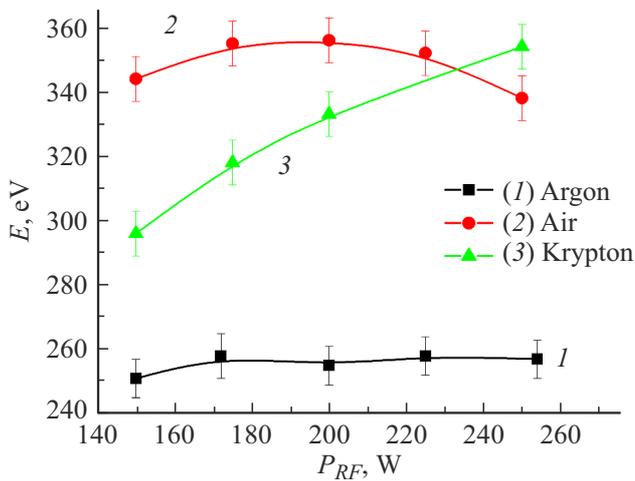


Рис. 7. Зависимость средней энергии ионного пучка от мощности ВЧ генератора для рабочих газов аргон, криптон и воздух. Частота генератора — 1356 MHz, $B = 140$ G.

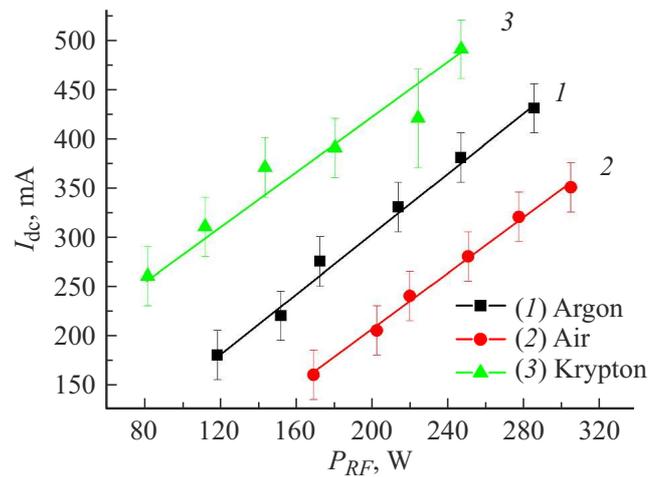


Рис. 8. Зависимость постоянного тока от мощности ВЧ генератора для рабочих газов аргон, криптон и воздух. Частота генератора — 1356 MHz, $B = 140$ G.

на ЕВЧР в геометрии СПД при наличии радиального магнитного поля в качестве электрического ракетного двигателя, были измерены средняя энергия ионов и постоянный ток для различных рабочих газов в зависимости от мощности ВЧ генератора. Измерения выполнялись со второй схемой организации разряда. Полученные данные о средней энергии и плотности ионов в струе, истекающей из источника плазмы, представлены на рис. 7 и 8.

Наибольшая энергия ионов достигается на рабочих газах криптон и воздухе и составляет около 350 eV. Поскольку в настоящее время активно ведутся разработки ЭРД, работающих на воздухе, данный результат указывает на перспективность применимости данного источника при полетах на низких околоземных орбитах.

Максимальный ток был получен на рабочем газе криптон, минимальный — на воздухе. Данный результат вполне закономерен и объясняется различием в потенциале и сечении ионизации газа.

Для того чтобы можно было сравнить параметры данного источника с действующими ЭРД, были рассчитаны следующие характеристики: величина потребляемой мощности для извлечения 1 А ионного тока и КПД двигателя. Стоит отметить, что это энергетический КПД, а не тяговый, который приводится в паспорте ЭРД. Тяговый КПД определить достаточно сложно, поскольку надо учитывать угловой разлет ионов на выходе из источника. Рассмотренные характеристики представлены в таблице.

Характеристики ЕВЧР двигателя для различных рабочих газов

Рабочий газ	Воздух	Аргон	Криптон
W/A	890	660	460
Энергия, eV	350	255	350
КПД, %	37	38	65

4. Обсуждение результатов

Физические свойства ЕВЧР в значительной степени определяются закономерностями образования слоев пространственного заряда вблизи электродов. Модификация ЕВЧР в схеме с разделительной емкостью (рис. 1, а) хорошо изучена [13,14,17,18]. Известно, что основное падение потенциала в разряде сосредоточено в приэлектродных слоях пространственного разряда. Рассмотренный в настоящей работе разряд сильно асимметричен, так как площадь нагруженного электрода существенно ниже площади заземленного электрода. Как следствие, в схеме с разомкнутыми по постоянному току электродами падение потенциала у нагруженного электрода U_a , согласно [13,14], должно существенно превышать падение потенциала у заземленного электрода U_p , которое близко к плавающему потенциалу. Выполненные ранее эксперименты [9] показали, что разность потенциалов между точками, лежащими в области канала и на расстоянии 4 см от него, близка к 75 В. Энергия ионов, ускоренных этой разностью потенциалов, составляет 70 eV. Учитывая, что самосмещение активного электрода при условиях эксперимента составляет 600–700 В, можно предположить, что $U_a \sim 600\text{--}700$ В. Значительное падение потенциала у нагруженного электрода приводит к ускорению ионов в его направлении и существенному выносу энергии из разряда. Соответственно доля мощности ВЧ генератора, идущая на ионизацию атомов и нагрев электронов в объеме источника плазмы, невелика, что приводит к относительно низкой концентрации электронов в разряде и малым значениям тока проводимости.

Зная падение потенциала и параметры плазмы, можно оценить толщину слоя у нагруженного электрода, приравняв значения тока ионов, текущего на электрод, рассчитанного по формуле Бома, току, рассчитанному, исходя из закона Чайльда–Ленгмюра [13]:

$$d_{sheath} = \left(\frac{1.86}{9\pi} \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{U_{sheath}^{\frac{3}{2}}}{en_+v_+} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где n_+ — плотность ионов, $v_+ = 0.4 \sqrt{\frac{2kT_e}{M}}$ — скорость ионов, M — масса ионов, d_{sheath} — толщина слоя, U_{sheath} — падение потенциала в слое.

Оценки показывают, что при условиях экспериментов толщина слоя не превышала 0.6 см, при этом емкость слоя составляла величину менее 4 pF. При этом не удивительно, что основной вклад в ВЧ ток, текущий между

электродами, вносит ток смещения, что наблюдалось экспериментально.

Для ВЧ емкостного разряда с замкнутыми по постоянному току электродами характерен так называемый батарейный эффект [13–15,19,20]. В любом ВЧ емкостном разряде в пределах периода плазма изменяет свое положение — колеблется, попеременно касаясь одного или другого электрода. В случае, когда электроды замкнуты, а площадь электродов сильно различается (асимметричный 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, покидающих канал источника плазмы.

Измерения потенциала плазмы в канале, а также энергии ионов показывают, что падение потенциала в слое при использовании схемы с замкнутыми по постоянному току электродами составляет величину порядка 250 В. По сравнению со схемой с разомкнутыми по постоянному току электродами, вынос энергии ионами понижается, концентрация плазмы растет, понижается размер приэлектродных слоев и возрастает емкость слоев. Это сопровождается увеличением тока проводимости по сравнению с током смещения, что зафиксировали выполненные эксперименты.

Третья схема организации разряда представляет собой комбинацию ЕВЧР и РПТ. ВЧ канал управляется изменением мощности ВЧ генератора, а канал РПТ — изменением величины смещения, подаваемого на нагруженный электрод. Положительное смещение активного электрода сопровождается увеличением плотности плазмы в канале, так как в разряд поступает дополнительная мощность от источника постоянного тока. Это приводит к уменьшению слоя у нагруженного электрода, увеличению ВЧ тока, текущего между электродами, и его активной части, а также дополнительному росту I_{dc} . Еще одним следствием наличия канала РПТ является его влияние на ВЧ канал, которое проявляется в понижении ВЧ напряжения, приложенного к электродам при той же мощности ВЧ генератора. Последнее является причиной слабого роста энергии ионов при увеличении величины положительного смещения нагруженного электрода.

С повышением рабочей частоты увеличивается энергия ионного пучка. При этом для каждой частоты характерна слабая зависимость средней энергии ионов от мощности ВЧ генератора. Рост энергии ионов с повышением частоты можно объяснить, воспользовавшись результатами [14]. Оценки показывают, что при работе на частотах 2 и 4 МГц частота генератора ω меньше ионной ленгмюровской частоты ω_{oi} . В этом

случае импеданс приэлектродных слоев соизмерим с импедансом плазмы, и часть потенциала падает в плазменной области. С повышением частоты импеданс плазмы уменьшается, и большая часть потенциала падает в приэлектродном слое, что увеличивает энергию ионного пучка.

Очень слабая зависимость параметров источника плазмы от индукции магнитного поля при B , превышающих 140 Г, коррелирует со слабой зависимостью параметров разряда в СПД, работающем на постоянном токе. При использовании разряда постоянного тока в качестве рабочего процесса СПД этот эффект объясняется аномальной проводимостью плазмы [21–23]. Вопрос о механизме проводимости плазмы при использовании ЕВЧР в качестве рабочего процесса нуждается в дополнительном исследовании.

Заключение

В работе выполнены экспериментальные исследования характеристик ЕВЧР, помещенного в магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей. Эксперименты выполнены в источнике плазмы, имеющем геометрию стационарного плазменного двигателя. Интегральные характеристики разряда, а также аксиальное распределение зондового ионного тока насыщения в канале источника плазмы измерены при трех схемах организации внешней цепи разряда: с разомкнутыми и замкнутыми по постоянному току электродами, а также в комбинации емкостного разряда с разрядом постоянного тока. Основные измерения выполнены в аргоне в диапазоне расходов 0.75–1.8 mg/s и мощностей ВЧ генератора 80–300 W при частотах 2, 4 и 13.56 MHz при индукции магнитного поля, лежащей в диапазоне 100–300 Г. Показано, что при изменении схемы организации разряда происходит изменение рабочего диапазона ВЧ токов и напряжений, а также сдвига фаз между ними.

Максимальные ВЧ напряжение и ток наблюдаются в разряде с разомкнутыми по постоянному току электродами. При использовании схемы с замкнутыми по постоянному току электродами напряжение горения разряда и ВЧ ток меньше, чем в разомкнутой схеме, а сдвиг фаз по абсолютной величине уменьшается и приближается к 0° . Увеличение ВЧ тока при увеличении мощности ВЧ генератора происходит практически при постоянном ВЧ напряжении между электродами. Подача постоянного смещения на нагруженный электрод позволяет управлять рабочим диапазоном ВЧ напряжения и ВЧ тока. Также уменьшение рабочей частоты сопровождается смещением рабочего диапазона ВЧ напряжений и токов в область более низких значений. Внешнее магнитное поле при индукции выше 140 Г слабо влияет на рабочий диапазон и величины ВЧ напряжений и токов и импеданс разряда. Изменение схемы организации разряда также сопровождается существенной перестройкой аксиального распределения локальных параметров

плазмы: в схеме с разомкнутыми по постоянному току электродами наблюдаются два максимума ионного тока вблизи локализации квазистационарных скачков потенциала. Основной максимум ионного тока лежит вблизи нагруженного электрода, где сосредоточено основное падение квазистационарного потенциала. Вблизи среза канала максимум ионного тока существенно меньше; в схеме с замкнутыми электродами увеличивается падение квазистационарного потенциала у заземленного электрода, и основной максимум ионного тока смещается в область среза канала, где локализовано радиальное магнитное поле. Средняя энергия ионов в струе плазмы, исходящей из источника плазмы, существенно зависит от схемы организации разряда. В случае разомкнутых по постоянному току электродов и использовании аргона в качестве рабочего газа она составляет 70 eV, а в случае замкнутых электродов — 250 eV.

Выполнены оценки параметры плазменного двигателя на основе емкостного ВЧ разряда при работе на воздухе, аргоне и криптоне.

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] A.S. Filatyev, O.V. Yanova. *Acta Astronautica*, **158**, 23 (2019). DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.10.039
- [2] F. Romano. RF Helicon Plasma Thruster for an Atmosphere-Breathing Electric Propulsion System (ABEP) (PhD thesis, 2021)
- [3] P. Zheng, J. Wu, Yu Zhang, B. Wu. *Intern. J. Aerospace Engineer.*, **2020**, 1 (2020). DOI: 10.1155/2020/8811847
- [4] A.S. Filatyev, A.A. Golikov, A.I. Erofeev, S.A. Khartov, A.S. Lovtsov, D.I. Padalitsa, V.V. Skvortsov, O.V. Yanova. *Progress in Aerospace Sciences*, **136**, 100877 (2023). DOI: 10.1016/j.paerosci.2022.100877
- [5] И.И. Задириев, Е.А. Кралькина, К.В. Вавилин, Г.В. Швыдкий, А.Ф. Александров. *Прикладная физика*, **2**, 10 (2018).
- [6] И.И. Задириев, Е.А. Кралькина, К.В. Вавилин, Г.В. Швыдкий, А.Ф. Александров. *Прикладная физика*, **3**, 5 (2018)
- [7] И.И. Задириев, Е.А. Кралькина, К.В. Вавилин, Г.В. Швыдкий, А.Ф. Александров. *Прикладная физика*, **5**, 33 (2018).
- [8] G.V. Shvydkiy, I.I. Zadiriev, E.A. Kralkina, K.V. Vavilin. *Vacuum*, **180**, 109588 (2020). DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109588
- [9] Г.В. Швыдкий, И.И. Задириев, Е.А. Кралькина, К.В. Вавилин. *Прикладная физика*, **1**, 24 (2021). [G.V. Shvydkiy, I.I. Zadiriev, E.A. Kralkina, K.V. Vavilin. *Plasma Physics Reports* **47** (10), 1075 (2021). DOI: 10.1134/S1063780X2110010X]

- [10] K.P. Manash, P.K. Chattopadhyay, D. Bora. *Measurement Science and Technology*, **18** (8), 2673 (2007).
- [11] А.А. Шаталин, А.Е. Калинычев. Сборник докладов 16-й научно-технической конференции „Молодежь в науке“. (Саров, 2017), с. 351.
- [12] Г.В. Швыдкий. *Теплофизика высоких температур*. **1** (2023) (в печати)
- [13] Ю.П. Райзер, М. Н. Шнейдер, Н. А. Яценко. *Высокочастотный емкостной разряд* (МФТИ, М., 1995)
- [14] В.П. Савинов. *Физика высокочастотного емкостного разряда* (Физмалит, М., 2013)
- [15] I.V. Schweigert, D.A. Ariskin, T.V. Chernoziumskaya, A.S. Smirnov. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **20** (1), 015011 (2011). DOI: 10.1088/0963-0252/20/1/015011
- [16] A. Diallo, S. Keller, Y. Shi, Y. Raitses, S. Mazouffre. *Rev. Scientific Instrum.*, **86** (3), 033506 (2015). DOI: 10.1063/1.4914829
- [17] M.A. Lieberman, A.J. Lichtenberg. *Principles of Plasma Discharges and Material Processing* (John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2005)
- [18] P. Chabert. *Physics of Radio-Frequency Plasmas* (Cambridge University Press, 2011)
- [19] J. Upadhyay, J. Peshl, S. Popović, A.-M. Valente-Feliciano, L. Vušković. *AIP Adv.*, **8** (8), 085008 (2018). DOI: 10.1063/1.5045692
- [20] M.D. Wiebold. *Dissertation Submitted in a Partial Fulfillment of Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy* (Madison, University of Wisconsin, 2011)
- [21] B.A. Jorns, S.E. Cusson, Z. Brown, E. Dale. *Phys. Plasmas*, **27** (2), 022311 (2020). DOI: 10.1063/1.5130680
- [22] B. Jorns. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **27** (10), 104007 (2018). DOI: 10.1088/1361-6595/aae472
- [23] А.И. Морозов, А.П. Шубин. *Письма в ЖТФ*, **10** (1), 28 (1984).