

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА



На правах рукописи

Швыдкий Георгий Вячеславович

**Характеристики высокочастотного емкостного разряда
в квазирадиальном магнитном поле**

Специальность: 1.3.9 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2022

Работа выполнена в теоретическом отделе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральном исследовательском центре «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» и на кафедре физической электроники физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

**Научные
руководители:**

Игнатов Александр Михайлович,
доктор физико-математических наук, профессор
Кралькина Елена Александровна,
доктор физико-математических наук

**Официальные
оппоненты:**

Синкевич Олег Арсеньевич,
доктор физико-математических наук, профессор, профессор
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ» (
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Савинов Владимир Павлович,

доктор физико-математических наук, доцент, доцент
кафедры физики полупроводников и криоэлектроники
физического факультета Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Московский государственный университет имени
М. В. Ломоносова».

Андреев Виктор Викторович,

кандидат физико-математических наук, доцент, зам.
директора института по научной работе, доцент
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
"Российский университет дружбы народов" (РУДН)

Защита диссертации состоится «15» декабря 2022 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета МГУ.013.7 (МГУ.01.12) Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, Физический факультет МГУ, ауд. ____.

E-mail: igorkartashov@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский просп., д.27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/496099530/>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

к.ф.-м.н.



И.Н. Карташов

Актуальность темы

Емкостной высокочастотный разряд (ЕВЧР) низкого давления в течение многих лет является объектом интенсивных фундаментальных исследований, обусловленных как богатством физических процессов, происходящих в разряде, так и потребностями промышленности. В последние годы наряду с хорошо известными технологическими применениями ЕВЧР в качестве рабочей среды газовых лазеров, плазменных реакторов, предназначенных для травления полупроводниковых пластин и т.д., возникло новое технологическое направление - использования разряда в качестве рабочего процесса космических электроракетных двигателей.

Одной из новых, актуальных задач, стоящих перед космической отраслью, является организация полетов космических аппаратов на сверхнизких околоземных орбитах (~200км). Наличие остаточной атмосферы на высотах порядка 200 км требует оснащения космических аппаратов двигателями, способными долговременно 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 ЕВЧР. Во-первых, ЕВЧР легко поджигается и горит как в инертных, так и в химически активных газах, не требуя наличия эмитирующего электроны катода. Во-вторых, электроды ЕВЧР могут быть вынесены за пределы разрядного промежутка, что сводит к минимуму эрозию электродов за счет взаимодействия их материала с химически активными частицами. В-третьих, при использовании схемы организации разряда с разомкнутыми по постоянному току электродами потоки электронов и ионов, поступающие на электроды, скомпенсированы по величине в пределах периода ВЧ поля. Это свойство разряда может позволить отказаться от использования нейтрализатора.

Обзор литературы показывает, что перспективным направлением использования ЕВЧР в космической технике является замена рабочего процесса стационарного плазменного двигателя (СПД) на основе разряда постоянного тока на емкостной разряд. Возможность замены обусловлена следующими фактами: также как в разряде постоянного тока, в ЕВЧР рядом с электродами возникают скачки квазистационарного потенциала, которые при наличии квазирадиального магнитного поля должны приводить к появлению азимутального дрейфа электронов и ускорению ионов.

Наряду с решением ряда практических задач, использование ЕВЧР в качестве рабочего процесса СПД требует решения целого ряда фундаментальных задач. Диссертация посвящена комплексному систематическому экспериментальному исследованию фундаментальных свойств ЕВЧР с внешним квазирадиальным магнитным полем, а именно

вольт-амперных характеристик (ВАХ) и импеданса разряда, пространственного распределения параметров плазмы внутри прототипа электроракетного двигателя, энергии ионов в струе и исходящей из него плазмы в зависимости от схемы организации разряда, рабочей частоты, индукции внешнего магнитного поля, а также типа рабочего газа, включая воздух. Диапазон рассмотренных внешних параметров разряда соответствует типичным условиям работы СПД. Из сказанного следует, что тема диссертационной работы является актуальной и востребованной.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является комплексное исследование влияния внешних параметров на свойства ВЧ емкостного разряда низкого давления при наличии внешнего магнитного поля с преимущественной радиальной составляющей.

Задачи диссертационной работы

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. На основе обзора литературы выделить и проанализировать влияние внешних параметров емкостного ВЧ разряда на параметры плазмы и распределение потенциала в приэлектродных слоях разряда.
2. Экспериментально исследовать продольное распределение параметров плазмы в источнике плазмы и в струе на выходе из источника, имеющего геометрию СПД, в зависимости от величины внешнего магнитного поля, рабочей частоты, расхода и типа рабочего газа в двух режимах горения разряда: при наличии и отсутствии замыкания электродов по постоянному току.
3. Экспериментально исследовать электротехнические характеристики разряда, а именно действительную и мнимую части его импеданса, в зависимости от величины внешнего магнитного поля, рабочей частоты, расхода и типа рабочего газа в двух режимах горения разряда: при наличии и отсутствии замыкания электродов по постоянному току.
4. Экспериментально исследовать влияние подключения дополнительного канала постоянного тока на параметры емкостного ВЧ разряда и исходящей из него плазменной струи, при наличии внешнего магнитного поля с преимущественной радиальной составляющей.

Научная новизна

Впервые выполнены комплексные систематические экспериментальные исследования физических свойств ЕВЧР низкого давления, помещенного в магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей в геометрии

стационарного плазменного двигателя: рассмотрены локальные и интегральные параметры плазмы при различных схемах организации разряда; установлено влияние схемы организации разряда на ВАХ разряда, квазистационарный потенциал плазмы, энергию ионов, концентрацию плазмы и ее распределение вдоль разрядного канала.

Впервые изучены интегральные характеристики указанного разряда в геометрии стационарного плазменного двигателя при изменении рабочей частоты (2, 4 и 13.56 МГц). Изучены изменения с частотой ВАХ, сдвиг фаз между ВЧ напряжением и током, энергия и плотность ионного пучка.

Впервые показано, что ВАХ, импеданс разряда, концентрация плазмы и плотность ионного тока слабо зависят от величины квазирадиального магнитного поля при его величинах более 140 Гс.

Впервые был рассмотрен вопрос о механизме переноса электронов поперек магнитного поля в ЕВЧР в геометрии стационарного плазменного двигателя. Разработанная математическая модель в совокупности с экспериментальными измерениями импеданса разряда показала неприменимость классической столкновительной модели проводимости электронов поперек магнитного поля для описания проводимости в исследуемом разряде.

Новые полученные результаты позволили рассматривать изучаемый источник ионов в качестве электрического ракетного двигателя (ЭРД). Были измерены характеристики источника плазмы (энергия и плотность ионного потока) для рабочих газов криптон и воздух, использование которых является актуальным в современных ЭРД.

Достоверность полученных результатов

Экспериментальная работа выполнялась с использованием надежного сертифицированного оборудования и общепринятых методик измерений и диагностик плазмы. Измерения проводились в соответствии с правилами научного эксперимента. В работе применялись современные методы сбора, хранения и обработки данных, а результаты сопоставлялись с ранее достоверно проведенными исследованиями, теоретическими расчетами и математическим моделированием. Это позволяет считать результаты обоснованными и достоверными.

Практическая ценность результатов

Комплексные, систематические экспериментальные исследования физических свойств ЕВЧР низкого давления, помещенного в магнитное поле с преимущественной радиальной составляющей, выполненные в диссертации, позволили выделить ряд закономерностей, знание которых необходимо для разработки и оптимизации ВЧ электрических ракетных двигателей, имеющих

геометрию СПД, а также промышленного источника ионов для наземного применения.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

- Емкостной высокочастотный разряд (ЕВЧР) с замкнутой по постоянному току схемой организации при рассмотренных одинаковых внешних условиях (мощность ВЧ генератора 90-300 Вт, частота – 2, 4 и 13.56 МГц, расход газа 25 – 60 см³/мин, магнитные поля 105-300 Гс) имеет более высокий квазистационарный потенциал плазмы (270 В), концентрацию плазмы в канале ($6 \cdot 10^{10}$ см⁻³) и энергию ионного пучка (250 эВ) по сравнению с ЕВЧР со схемой с разомкнутыми по постоянному току электродами, где соответствующие параметры составляют 70 В, $2 \cdot 10^{10}$ см⁻³ и 25 эВ. Максимум концентрации плазмы при использовании «замкнутой» схемы расположен в месте локализации магнитного поля, в «разомкнутой» – возле нагруженного электрода.
- Уменьшение рабочей частоты с 13.56 до 2 МГц сопровождается смещением рабочего диапазона высокочастотных (ВЧ) напряжений и токов в область более низких значений с 550-580 В до 420-470 В и с 1.2-1.5 А до 0.4-0.75 А соответственно. При этом, сдвиг фаз между ними уменьшается по абсолютной величине. Энергия ионов уменьшается с 275 до 185 эВ, а постоянный ток при использовании замкнутой схемы увеличивается на 15 мА.
- Внешнее магнитное поле при индукции выше 150 Гс слабо влияет на величины ВЧ напряжений и токов, импеданс разряда и на постоянный ток. Увеличение магнитного поля с 105 до 320 Гс уменьшает энергию ионов с 275 до 240 эВ.
- Проводимость плазмы между электродами в ЕВЧР при наличии квазирадиального магнитного поля не описывается классическим механизмом проводимости.
- Максимальная энергия ионов наблюдались для рабочих газов воздух и криптон и составляла до 355 эВ, максимальный постоянный ток - для газа криптон (500 мА при мощности ВЧ генератора 240 Вт).

Апробация результатов и публикации автора

По мере получения результатов происходило их обсуждение на семинаре теоретического отдела ИОФ РАН. Основные результаты были представлены на 45-й и 46-й Звенигородских конференциях по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, на XI Международной научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» а также на научных семинарах ИОФ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, РУДН. По теме диссертации было

опубликовано 6 статей, 3 из которых индексируемы в базе данных Web of Science, 3 в Scopus, и 2 тезиса в сборниках трудов и конференций.

Личный вклад автора

Все результаты, полученные в представленной работе, были выполнены непосредственно автором, либо при его участии. Автором была модернизирована лабораторная модель источника ионов и подготовлено измерительное оборудование. Был проведен эксперимент с последующей обработкой и анализом результатов. Автор работы также принимал участие в расчете и написании программы по созданию математической модели разряда и интерпретации полученных результатов.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа включает в себя следующие разделы: введение, 4 главы, заключение и список цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 161 страниц и включает в себя 79 рисунков и 1 таблицу. Библиография состоит из 109 наименований.

Содержание работы

Во **введении** показывается актуальность исследуемой темы, перечисляются поставленные цели и задачи работы, делается заключение о научной новизне, достоверности и практическом применении полученных результатов, описывается объект и предмет исследования. Кратко рассказывается о методологии диссертационного исследования. Далее представлены положения, выносимые на защиту, предоставляются данные об апробации работы, опубликованных и доложенных на конференциях результатах, личном вкладе автора. Введение завершается данными о структуре и объеме диссертации, кратким описанием глав работы.

В **первой главе** представлен обзор литературы по теме диссертации. В начале обзора представлена краткая историческая справка, посвященная разработке и использованию ускорителей с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП). В частности, акцент делается на использовании ускорителей в качестве стационарного плазменного двигателя, разработанного А.И. Морозовым [1]. Далее объясняются физические принципы работы и конструкция УЗДП. После этого рассматривается наиболее интересная и фундаментальная проблема физики разряда УЗДП – исследование механизма переноса электронов между катодом и анодом. Показано, что модель разряда в УЗДП, основанная на классической модели проводимости поперек магнитного поля, не описывает экспериментально наблюдаемый разрядный электрический ток. Добавление механизма пристеночной проводимости улучшает согласие между экспериментальными и расчетными результатами, но полностью не компенсирует разницу между ними. В связи с этим далее рассматриваются работы, посвященные

аномальной проводимости в УЗДП, которая возникает из-за наличия азимутальных волн и неустойчивостей. Их учет позволяет добиться удовлетворительного описания экспериментов.

Следующая часть главы посвящена рассмотрению возможности использования емкостного ВЧ разряда в качестве основного рабочего процесса в УЗДП. Впервые такой подход был предложен в работе [2]. Сравниваются преимущества и недостатки такого подхода для организации ускоренного потока ионов. Учитывая перспективность организации такого разряда, дальнейшая часть посвящена рассмотрению физики емкостного ВЧ разряда. С помощью однородной модели разряда рассматриваются основные параметры приэлектродных слоев и падение потенциала в них в зависимости от схемы организации разряда. Рассмотрены условия, при которых параметры слоя будут оптимальны для использования источника в качестве электрических ракетных двигателей (ЭРД). Особое внимание уделено рассмотрению импеданса разряда, зависимостей параметров плазмы от схемы организации разряда и от рабочей частоты генератора [3].

Вторая глава посвящена описанию экспериментальной установки и методикам измерения, включая методы обработки данных. В экспериментальных исследованиях использовался источник плазмы, выполненный в геометрии двигателя СПД-70. 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 м^3 , при этом корпус источника заземлялся. Вакуумная камера откачивалась каскадом из двух насосов – форвакуумного и турбомолекулярного до давления $3 \cdot 10^{-5} \text{ Тор}$, а во время горения разряда давление изменялось в диапазоне от $8 \cdot 10^{-4}$ до $3 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$ в зависимости от условий эксперимента. Основным рабочим газом являлся аргон, однако, ряд экспериментов проводился с криптоном и воздухом.

Активный электрод, расположенный в глубине канала, подключался к внешнему высокочастотному генератору через систему согласования двумя способами – с размыканием и замыканием по постоянному току. Соответствующие схемы представлены на рис. 1. В первом случае активный и заземленный электрод были разделены по постоянному току. Для реализации второго способа подключения между электродами подсоединялся дроссель – спираль с высокой индуктивностью, которая позволяла протекать постоянному току. Частота ВЧ генератора составляла 13.56, 4 и 2 МГц, диапазон мощностей 90-300 Вт. В большинстве случаев отраженная мощность ВЧ генератора не превышала 15 Вт.

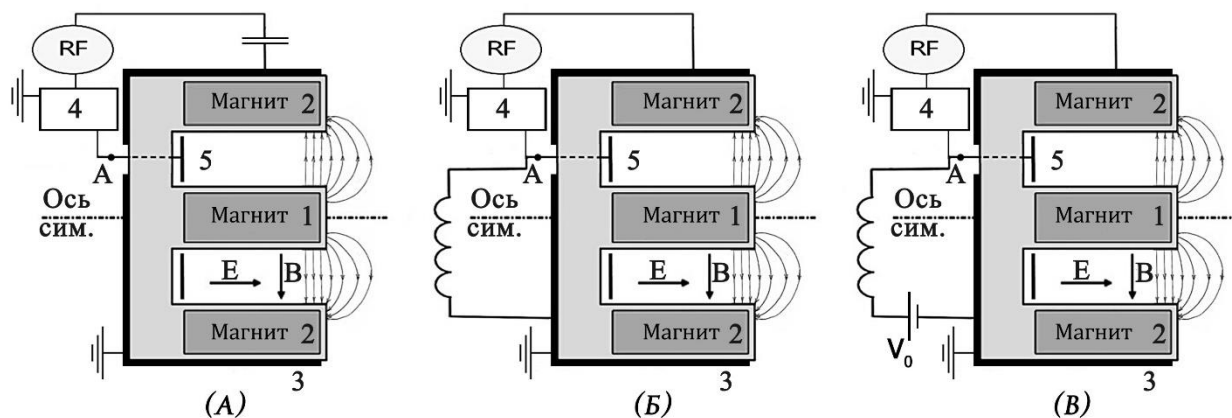


Рисунок 1 - Схемы подключения ЕВЧР. А – с разделительной емкостью, Б – с замыканием по постоянному току, В – комбинированный разряд с источником постоянного напряжения. 1,2 – внутренняя и внешние катушки магнитов, 3 – заземленный корпус, 4 – система согласования, 5 – нагруженный электрод

Экспериментальная часть работы состояла из:

1. Измерения ВАХ и импеданса разряда;
2. Измерения энергии ионов с помощью энергоанализатора;
3. Измерения потенциала и концентрации плазмы вдоль разрядного канала;
4. Спектральных измерений;

В **третьей** главе описываются экспериментально полученные результаты. Глава начинается с рассмотрения интегральных характеристик разряда в зависимости от схемы его организации. В схеме с разомкнутыми по постоянному току электродами зависимость ВЧ напряжения и тока от времени с хорошей степенью точности описывается законом косинуса. При замыкании их по постоянному току те же зависимости являются сильно негармоничными. Фурье-анализ показал, что в спектре ВЧ тока присутствуют первая, вторая и третья гармоники, в то время как напряжение главным образом представлено основной гармоникой.

В рассмотренном диапазоне мощностей ВЧ генератора максимальное ВЧ напряжение $U_{RF}(t)$ и ток $I_{RF}(t)$ на активном электроде достигается в случае, когда электроды разомкнуты по постоянному току, и составляет 1200-1500 В и 2 - 2.8 А соответственно. Абсолютное значение сдвига фаз между ВЧ током и ВЧ напряжением близко к 90 градусам. При замыкании разряда по постоянному току напряжение горения разряда, как и ВЧ ток, уменьшаются. Так, амплитудные значения напряжения лежат в диапазоне 550 - 750 В, а значения тока – в диапазоне 1.1 - 1.6 А. Соответствующие графики представлены на рис. 2. Абсолютная величина сдвига фаз между $U_{RF}(t)$ и $I_{RF}(t)$

существенно ниже, чем в предыдущем случае. Это указывает на уменьшение доли тока смещения и повышении доли тока проводимости в полном токе. При подаче положительного относительно земли потенциала V_{disp} на нагруженный электрод наблюдается существенное падение рабочего напряжения и рост токов: высокочастотного I_{RF} и постоянного I_{dc} , который течет в разрядной цепи. Обращает на себя внимание, что абсолютное значение сдвига фаз между ВЧ током и напряжением существенно уменьшается и приближается к 0 град. При подаче отрицательного относительно земли потенциала межэлектродное ВЧ напряжение и ВЧ ток занимают промежуточное положение между ВАХ разряда с разомкнутыми и замкнутыми электродами.

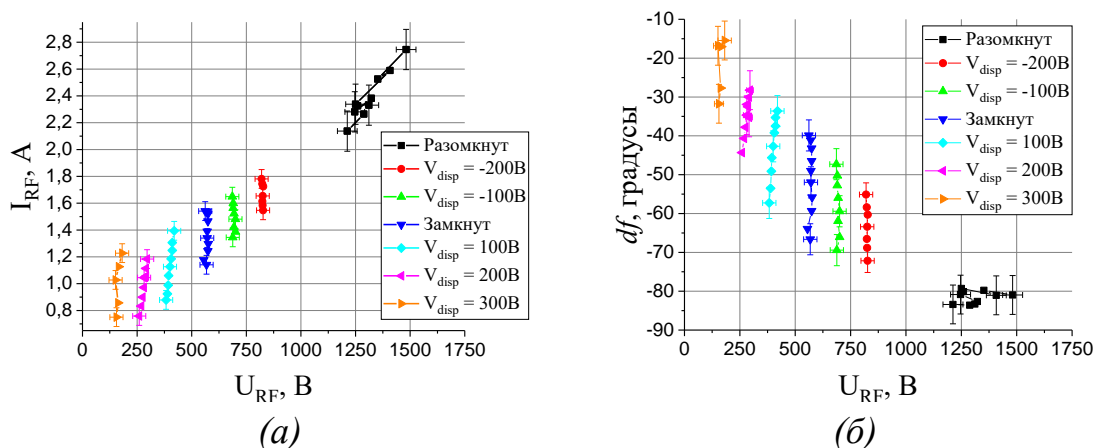


Рисунок 2 - ВАХ разряда (а) с сдвиг фаз между ВЧ током и напряжением (б) для трех схем подключения разряда. $B=180$ Гс. Рабочая частота 13.56 МГц

Далее проводилось изучение влияния схемы организации разряда на среднюю энергию ионного потока. Подтверждено, что минимальная энергия достигается при разомкнутой по постоянному току схеме (далее – разомкнутой) и составляет 25 эВ для газа аргон. При замыкании нагруженного электрода по постоянному току энергия ионов существенно возрастает – до 250 эВ, а дополнительная подача постоянного напряжения еще больше увеличивает энергию. Показано, что увеличение ВЧ мощности слабо влияет на энергию ионов, что объясняется поведением ВАХ.

Для разомкнутой по постоянному току схемы было измерено постоянное смещение нагруженного электрода, абсолютная величина которого увеличивалась при увеличении амплитуды ВЧ колебаний. В замкнутой по постоянному току схеме (далее – замкнутой) при подаче постоянного напряжения V_{disp} на нагруженный электрод измерялся постоянный ток, который увеличивался пропорционально ВЧ мощности генератора и величине постоянного напряжения. Предположительно,

постоянный ток пропорционален концентрации плазмы. Для проверки этого предположения были проведены спектральные измерения.

Спектральные измерения показали постоянство электронной температуры при изменении подаваемой ВЧ мощности и прямую пропорциональность между интенсивностью свечения атомарных линий и величинами постоянного тока, что свидетельствует в пользу того, что обе величины пропорциональны концентрации плазмы.

Следующий раздел посвящен изучению влияния рабочей частоты ВЧ генератора на параметры разряда. Рассматривались три частоты f : 2, 4 и 13.56 МГц. Зависимости ВАХ разряда для частоты 4 МГц при различных схемах организации разряда качественно близки к результатам, полученным на частоте 13.56 МГц. При замкнутых по постоянному току электродах в пределах одного и того же диапазона мощностей ВЧ генератора область рабочих ВЧ напряжений смещается в область меньших U_{RF} при понижении рабочей частоты. Сдвиг фаз по абсолютной величине максимален в случае $f=13.56$ МГц и минимален при $f=2$ МГц. При частотах 2 и 4 МГц для увеличения ВЧ тока требуется увеличение ВЧ напряжения, что может свидетельствовать о реализации режима, близкого к аномальному режиму горения тлеющего разряда. Данные зависимости продемонстрированы на рис. 3.

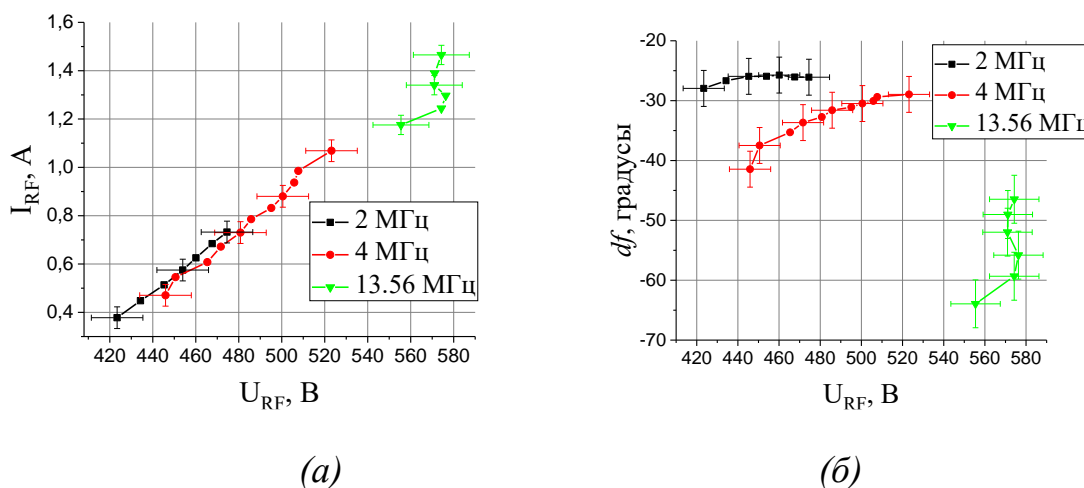


Рисунок 3 - ВАХ разряда (а) и сдвиг фаз между ВЧ током и напряжением (б) для случая разряда с замкнутыми электродами. $V=210$ Гс. Рабочие частоты 2, 4 и 13.56 МГц

Так же, на частотах 2 и 4 МГц, как и на 13.56 МГц, наблюдается линейный рост постоянного тока I_{dc} с увеличением вложенной ВЧ мощности. Величина постоянного тока для трех частот приблизительно одинакова, однако заметна небольшая тенденция увеличения разрядного тока с уменьшением рабочей частоты ВЧ генератора. С повышением рабочей

частоты увеличивается энергия ионного пучка. При этом для каждой частоты характерна слабая зависимость средней энергии ионов от мощности ВЧ генератора. Подача постоянного смещения V_{disp} на нагруженный электрод при работе на частоте 2, 4 и 13.56 МГц приводит к росту энергии ионов. Наибольшие значения при всех V_{disp} наблюдаются при рабочей частоте 13.56 МГц, наименьшие – при работе на частоте 2 МГц.

Следующий раздел посвящен влиянию индукции внешнего магнитного поля B на интегральные характеристики разряда. При малых значениях $B < 105$ Гс разряд поджигается в α - моде. При увеличении подаваемой ВЧ мощности разряд переходит в γ - моду. При этом напряжение горения сначала уменьшается, а дальнейший рост тока происходит при увеличении ВЧ напряжения между электродами. Одновременно начинает уменьшаться абсолютное значение разности фаз, указывая на повышение роли тока проводимости. Увеличение индукции магнитного поля сопровождается смещением области существования разряда в область меньших U_{RF} . Соответствующие результаты представлены на рис. 4.

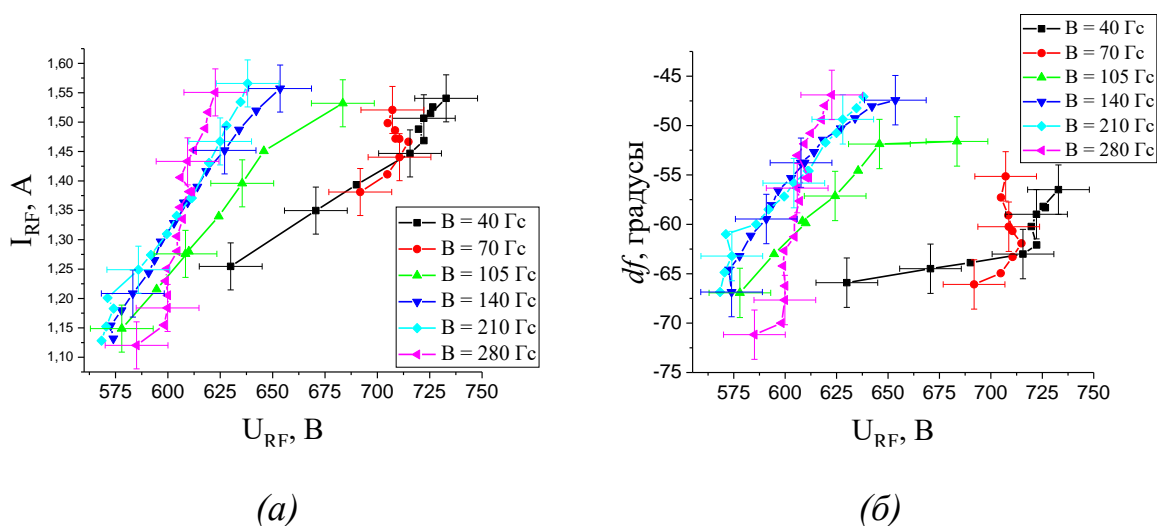


Рисунок 4 - ВАХ разряда (а) и сдвиг фаз между ВЧ током и напряжением (б) при различных значениях индукции внешнего магнитного поля. Случай замкнутых по постоянному току электродов. Рабочая частота 13.56 МГц

В пределах одного режима горения разряда изменения магнитного поля несущественным образом сказываются на характере ВАХ. Как для действительной, так и для мнимой частей импеданса характерна слабая зависимость от индукции внешнего магнитного поля при условии, что $B > 105$ Гс. Также наблюдается независимость постоянного тока I_{dc} от величины магнитной индукции. Энергия ионного пучка незначительно уменьшается с ростом B .

В следующем разделе Главы 3 описываются локальные параметры емкостного ВЧ разряда с квазирадиальным магнитным полем. Сначала рассматривается аксиальное распределение ионного тока насыщения с зонда Ленгмюра i_+ , который предполагается пропорциональным концентрации плазмы. Результаты измерений представлены на рис. 5. В случае использования схемы с разомкнутыми по постоянному току электродами аксиальное распределение $i_+(L)$ имеет вид, типичный для γ -режима емкостного ВЧ разряда, а именно, наблюдаются два максимума ионного тока вблизи локализации квазистационарных скачков потенциала. Основной максимум ионного тока лежит вблизи нагруженного электрода, где сосредоточено основное падение квазистационарного потенциала, а меньший максимум располагается вблизи среза канала, где локализовано магнитное поле, что и является причиной образования этого максимума. В схеме с замкнутыми электродами увеличивается падение квазистационарного потенциала у заземленного электрода, и основной максимум ионного тока смещается в область среза канала, где локализовано квазирадиальное магнитное поле. Обращает на себя внимание, что при использовании замкнутой схемы организации разряда значения ионного тока выше, чем при использовании разомкнутой схемы. Исходя из слабой зависимости температуры электронов от координаты вдоль разрядного канала можно сделать вывод, что при замыкании электродов по постоянному току концентрация электронов возрастает. При подаче отрицательного смещения на нагруженный электрод распределения $i_+(L)$ занимают промежуточное положение между замкнутым и разомкнутым случаем. При наличии положительного смещения на нагруженный электрод локальный максимум у нагруженного электрода существенно уменьшается, а локальный максимум у среза канала растет. Более того, область основного максимума ионного тока расширяется в область за срезом канала. Абсолютные значения ионного тока увеличиваются с ростом V_{disp} .

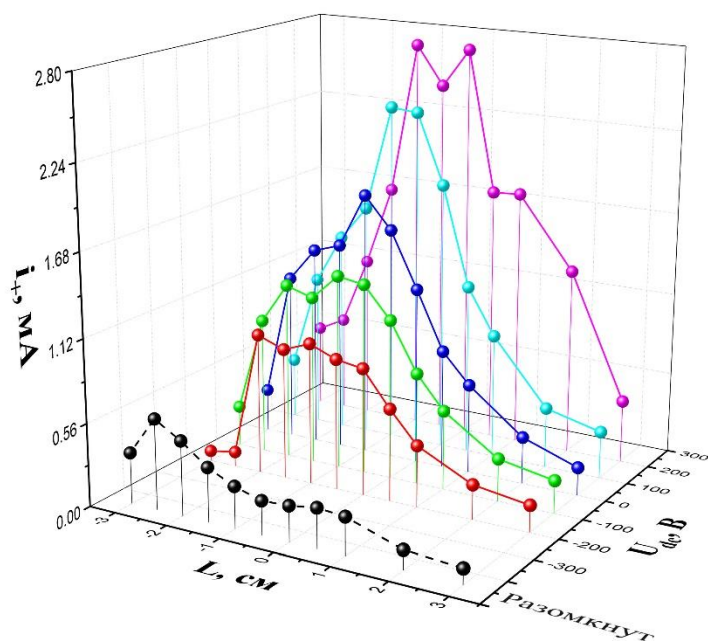
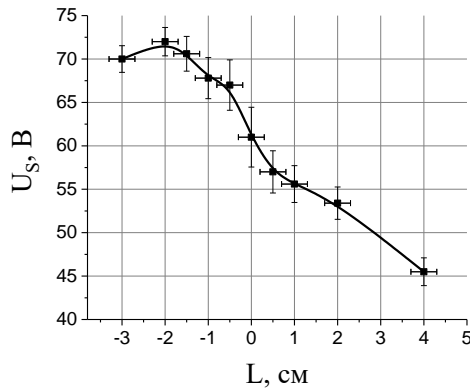
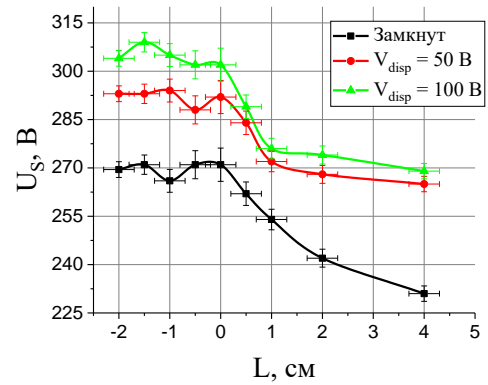


Рисунок 5 - Аксиальные распределения зондового ионного тока насыщения, измеренные при различных значениях постоянного смещения нагруженного электрода. Пунктирная кривая – аксиальное распределение ионного тока, измеренное в схеме с разомкнутыми по постоянному току электродами. Нулевая координата по L соответствует положению среза канала, отрицательные числа – координаты соответствуют положениям зонда внутри канала, положительные – снаружи. Нагруженный электрод располагается в глубине канала на расстоянии 3.5 см от среза канала

Также, с помощью зонда Ленгмюра был определен потенциал плазмы для трех схем организации разряда. Измерения проводились при минимально возможном значении магнитного поля. Для разомкнутой схемы потенциал плазмы внутри канала составил 70 В. При замыкании он увеличился до 270 В. Приложенное постоянное напряжение в 100 В дополнительно увеличивает потенциал плазмы до 310 В. Максимальное значение наблюдается внутри разрядного канала и спадает за его пределами. При этом потенциал плазмы слабо меняется внутри канала. Соответствующие графики представлены на рис. 6.



(a)



(б)

Рисунок 6 - Аксиальное распределение потенциала плазмы для разомкнутой схемы (а) и замкнутой по постоянному току схемы с дополнительной подачей положительного напряжения (б)

Увеличение плотности плазмы может достигаться не только замыканием активного электрода по постоянному току и подачей положительного напряжения, но и увеличением мощности ВЧ генератора. При увеличении мощности со 150 до 250 Вт возрастает ионный ток на всем измеряемом участке. При этом характер кривых остается неизменным.

Значительно слабее на плотность ионного тока влияет величина внешнего квазирадиального магнитного поля. Плотность плазмы почти не зависит от величины магнитного поля во всем разрядном канале, что соответствует ранее проведенным исследованиям. Для подтверждения данного результата были проведены спектральные измерения, которые показали, что с увеличением магнитного поля происходит лишь незначительный спад интенсивности спектральных линии аргона 419.8, 420.0 и 425.9 нм.

Четвертая глава посвящена изучению импеданса разряда при различных внешних условиях с последующим сравнением результатов с математической моделью, которая основывается на классической проводимости электронов поперек магнитного поля.

Вольтамперные характеристики позволили рассчитать действительные $Re(Z)$ и мнимые $Im(Z)$ части импеданса разряда. В случае разряда с разомкнутыми электродами действительная часть импеданса не превышает 100 Ом, в то время как абсолютная величина мнимой части лежит в диапазоне 600 – 650 Ом. При замыкании разряда по постоянному току величины действительной и мнимой части импеданса растут, приближаются друг к

другу по абсолютной величине, которая составляет 250 - 300 Ом. Рост величины постоянного смещения V_{disp} нагруженного электрода сопровождается монотонным уменьшением мнимой части, а вот действительная часть импеданса ведет себя немонотонно. Максимальное значение $Re(Z)$ наблюдается при $V_{disp} = 100\text{В}$, оно достигает 280 Ом. Увеличение V_{disp} выше 100 В сопровождается падением действительной части импеданса. Данные результаты представлены на рис. 7. При рассмотрении зависимости действительной части импеданса от постоянного тока I_{dc} , (ранее было показано, что I_{dc} был принят пропорциональным концентрации плазмы), зависимость имеет немонотонный характер с различными положениями максимума $ReZ(I_{dc})$ для разных схем организации разряда. Мнимая часть импеданса линейно растет с увеличением постоянного тока.

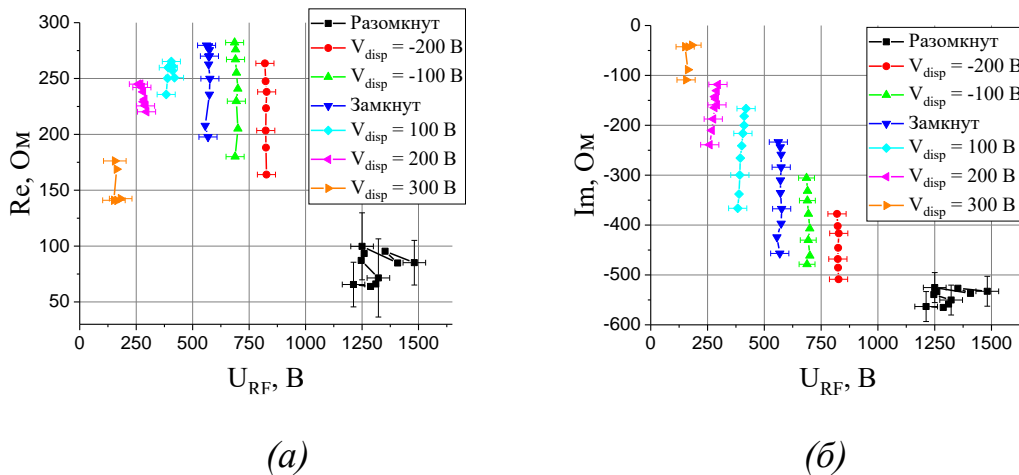


Рисунок 7 - Действительная (а) и мнимая (б) части импеданса в зависимости от ВЧ напряжения, приложенного к электродам

Рассматривая активное сопротивление в зависимости от постоянного тока I_{dc} , можно сказать, что для частоты 13.56 МГц максимум активного сопротивления лежит в области больших разрядных токов, а понижение частоты смещает этот максимум в сторону меньших концентраций. При этом происходит увеличение абсолютного значения сопротивления, максимальное значение которого составляло порядка 1000 Ом и реализовывалось на частоте 2 МГц. Мнимая же часть импеданса возрастает с увеличением тока, имеет тенденцию к насыщению и схожие абсолютные величины для всех исследуемых частот, что показано на рис. 8.

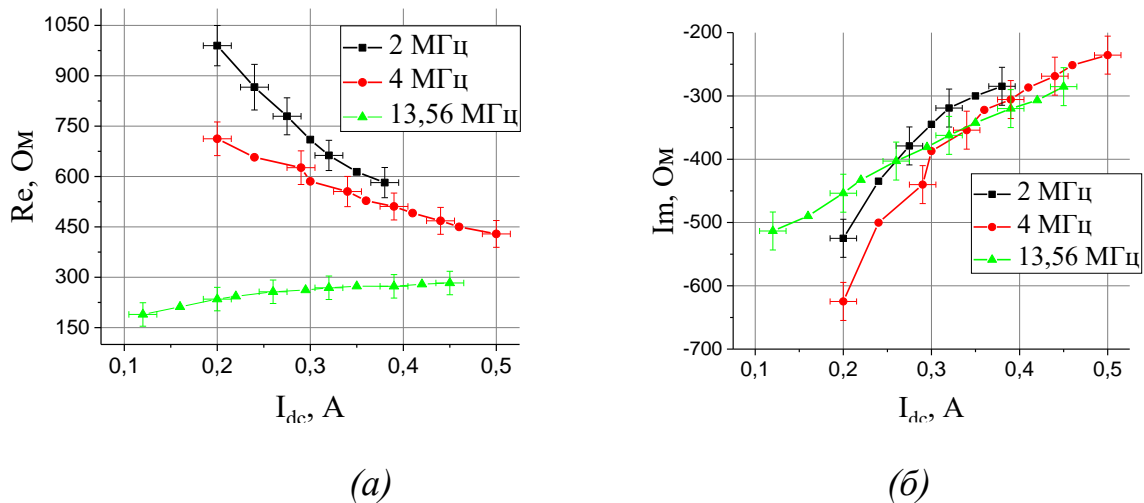


Рисунок 8 - Зависимость действительной (а) и мнимой (б) частей импеданса от величины постоянного тока для частот генератора 2, 4 и 13.56 МГц

Далее показано, что как для действительной, так и для мнимой частей импеданса характерна слабая зависимость от индукции внешнего магнитного поля при условии, что $B > 105$ Гс.

После получения экспериментальных зависимостей действительной и мнимой частей импеданса была разработана математическая модель, позволяющая рассчитать импеданс разряда. Сначала была разработана эквивалентная электротехническая схема разряда, которая описывает экспериментальный источник ионов. Схема разрядной цепи представлена на рис. 9. Разрядная цепь состоит из емкостей приэлектродных слоев C_{sh1} и C_{sh2} , сопротивления R_p , определяющего сопротивление разряда, где присутствует азимутальный дрейф электронов, и реактивного элемента L_p , который появляется вследствие наличия мнимой части проводимости плазмы. Далее, при разработке схемы были учтены особенности организации разряда. В случае замкнутых по постоянному току электродов параллельно разрядному промежутку был включен дроссель. Учтено также наличие паразитных емкостей: между активным электродом и землей C_4 и распределенной емкости между плазмой и металлическими стенками камер, которая в эквивалентной схеме представлена сосредоточенной емкостью C_2 . В рамках математической модели для расчета импеданса Z использовались формулы из работы [4] для импеданса плазменной части одномерного плазменного конденсатора малой длины. Эти формулы использовались в совокупности с выражениями для классической проводимости плазмы поперек магнитного поля.

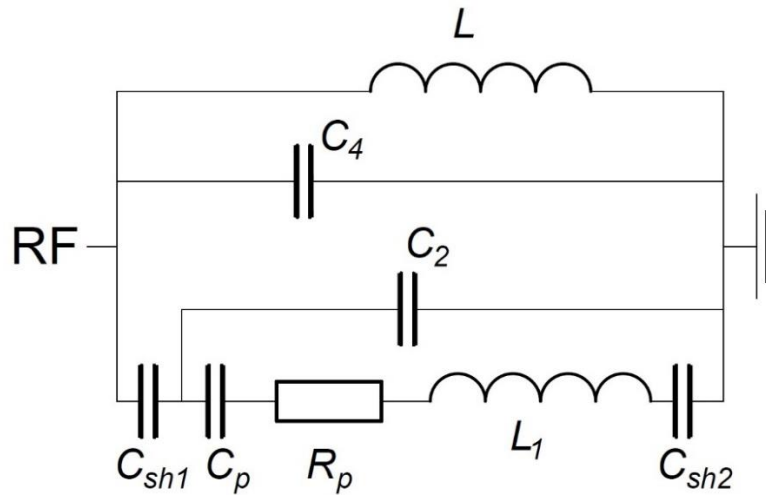


Рисунок 9 - Эквивалентная схема ЕВЧР разряда с внешним квазирадиальным магнитным полем

Для сравнения с экспериментальными результатами были получены зависимости действительной и мнимой части импеданса от концентрации плазмы. При всех значениях паразитной емкости C_2 наблюдается резонансный характер поведения действительной части импеданса в зависимости от концентрации плазмы. Рост емкости C_2 сопровождается значительным смещением максимумов действительной части импеданса в область больших значений концентраций плазмы n_e и понижением её абсолютных величин. Зависимость мнимой части импеданса также имеет резонансный характер. Однако присутствуют две точки экстремума – минимум и максимум. Как и в случае с емкостью C_2 , увеличение паразитной емкости C_4 значительно влияет на абсолютные значения импеданса. Так, с увеличением емкости действительная часть уменьшается, а мнимая увеличивается. Положение максимумов в меньшей степени зависят от величины емкости C_4 . Наблюдается лишь небольшое смещение в область больших концентраций с ростом C_4 .

Расчет при фиксированном значении емкостей C_2 и C_4 для различных значений емкости слоя при нагруженном электроде C_{sh1} показал, что увеличение емкости слоя сопровождается смещением максимумов действительной и мнимой частей импеданса в зависимости от концентрации плазмы в область больших n_e и увеличением абсолютных величин импеданса. Емкость при заземленном электроде C_{sh2} слабо влияет как на действительную, так и на мнимую часть импеданса. Такой результат ожидаем, поскольку емкость C_{sh2} включена последовательно с емкостью C_p , которая значительно меньше по величине и которая определяет суммарный импеданс этого участка цепи.

Индуктивность дросселя, замыкающего электроды по постоянному току, слабо влияет на импеданс электрической цепи при условии, что величина его индуктивности больше 100 мкГн.

Величина магнитного поля влияет на положение максимума и на ширину пика как действительной, так и мнимой части импеданса. Так, с увеличением магнитного поля максимум смещается в сторону больших концентраций n_e , а пик уширяется.

Для разомкнутого случая зависимость импеданса от концентрации электронов для разных частот показала, что увеличение частоты приводит к уменьшению действительной части импеданса и увеличению мнимой, а также смещению пика в сторону больших концентраций. Схожая картина наблюдается и для замкнутого случая за исключением резонансного увеличения действительной части импеданса и уменьшения мнимой части в зоне частот менее 3 МГц.

Таким образом, сравнения показали, что модель с классической проводимостью не в полной мере воспроизводит результаты экспериментов и, поэтому, не может использоваться для описания проводимости электронов поперек магнитного поля.

В работах [5,6] показано, что удовлетворительное согласие теоретических расчетов и экспериментальных результатов можно получить если увеличить частоту столкновения электронов и атомов в 100 – 1000 раз. Поэтому последняя часть этой главы посвящена проверке соответствия расчетных и экспериментальных измерений в случае, если частота столкновения электронов и атомов увеличена в 1000 раз. Показано, что при таком условии зависимость импеданса плазмы от частоты и величины магнитного поля с хорошей степенью точности соответствуют экспериментальным измерениям. Исключением составляет мнимая часть импеданса в зависимости от рабочей частоты, где наблюдается сильное изменение абсолютной величины импеданса.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

1. При рассмотренных внешних условиях (мощность ВЧ генератора 90-300 Вт, частота – 2, 4 и 13.56 МГц, расход газа 25 – 60 см³/мин, магнитные поля 105-300 Гс) 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 сдвиге фаз близком к 90 град. 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. 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.

2. Внешнее магнитное поле при индукции выше 150 Гс слабо влияет на рабочий диапазон и величины ВЧ напряжений и токов и импеданс разряда.

3. Изменение схемы организации разряда 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 квазирадиальное магнитное поле. Значения ионного тока насыщения выше, чем при использовании разомкнутой по постоянному току схемы; при подаче положительного смещения на нагруженный электрод локальный максимум у нагруженного электрода существенно уменьшается, а локальный максимум у среза канала растет и расширяется в область за срез канала. При использовании схемы с замкнутыми по постоянному току электродами концентрация плазмы в области среза составляла $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, дополнительные 100 В постоянного смещения увеличили эту концентрацию до $1.1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$.

4. 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 25 эВ, а в случае замкнутых электродов – 250 эВ. Увеличение постоянного смещения нагруженного электрода от 0 до 300 В сопровождается ростом средней энергии ионов от 250 до 310 эВ. Средняя энергия ионов слабо понижается при уменьшении рабочей частоты и увеличении индукции магнитного поля при значениях выше 150 Гс. Наилучший результат по энергетической экономичности был получен для рабочего газа криптон. Наибольшая энергия ионного пучка реализуется на рабочих газах криптон и воздух.

5. Действительная часть импеданса возрастает с увеличением постоянного тока, текущего между электродами, при рабочей частоте 13.56 МГц и падает при частотах 2 и 4 МГц. При подаче постоянного смещения на нагруженный

электрод действительная часть импеданса немонотонно зависит от постоянного тока. Мнимая часть импеданса во всех рассмотренных случаях возрастает с увеличением постоянного тока, текущего между электродами.

6. Расчеты, выполненные на основании численной модели разряда, предполагающей существование классического механизма проводимости плазмы поперек магнитного поля, выявили различия в поведении расчетных и измеренных зависимостей действительной и мнимой частей импеданса от величины индукции внешнего магнитного поля, что указывает на существование более сложного механизма аксиальной проводимости плазмы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках
научного проекта № 19-32-90132 «Аспиранты»*

Список опубликованных статей по теме диссертации (Scopus, Web of Science и RSCI):

- A1. Задириев И.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Швыдкий Г.В., Александров А.Ф. *Комбинация емкостного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Часть I. Вольтамперная характеристика и импеданс разряда* // Прикладная физика – №2 – с.10-14 – 2018 (SJR Scopus 0.133)
- A2. Задириев И.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Швыдкий Г.В., Александров А.Ф. *Комбинация емкостного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Часть II. Функции распределения ионов по энергиям* // Прикладная физика – №3 – с.3-5 – 2018 (SJR Scopus 0.133)
- A3. Задириев И.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Тараканов В.П., Швыдкий Г.В., Александров А.Ф. *Комбинация емкостного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Часть III. Математическое моделирование* // Прикладная физика – №5 – с.33-37 – 2018 (SJR Scopus 0.133)
- A4. Kralkina E.A., Vavilin K.V., Zadiriev I.I., Nekliudova P.A., Shvydkiy G.V. *Optimization of discharge parameters in an inductive RF ion thruster prototype* // Vacuum – v.167 – p.136-144 – 2019 (IF WoS 2.906)
- A5. Shvydkiy G.V., Zadiriev I.I., Kralkina E.A., Vavilin K.V. *Acceleration of ions in a plasma accelerator with closed electron drift based on a capacitive radio-frequency discharge* // Vacuum – v.180 – 109588 – 2020 (IF WoS 3.627)

А6. Швыдкий Г.В., Задириев И.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В. *Влияние внешней цепи на параметры плазмы в канале высокочастотного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов* // Прикладная физика – №1 – с.24-30 – 2021 (SJР Scopus 0.216) [Shvydkiy G.V., Zadiriev I.I., Kralkina E.A., Vavilin K.V. *Influence of an external circuit on the plasma parameters in the channel of the radio-frequency accelerator with a closed electron drift* // Plasma Physics Reports – v. 47(10) – p.1075-1079 – 2021 (IF WoS 1.133)]

Другие опубликованные работы по теме диссертации:

- А1. Швыдкий Г.В., Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Задириев И.И. *Влияние постоянного смещения активного электрода на энергию ионов в емкостном ВЧ разряде с внешним магнитным полем* // Труды 45-й конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – Звенигород, 2018 – 2-6 апр. – с. 295
- А2. Швыдкий Г.В., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Задириев И.И., Никонов А.М., Черников В.А., Александров А.Ф. *Влияние постоянного смещения активного электрода на энергию ионов в емкостном ВЧ разряде с внешним магнитным полем* // Труды 46-й конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. – Звенигород, 2019 – 18-22 марта – с. 229

Цитированная литература:

1. Морозов, А. И. *Введение в плазмодинамику* / А. И. Морозов; под ред. Рокотяна В. Е. — Москва: Физмалит, 2006. — 567 с.
2. Задириев И. И. *Использование емкостного высокочастотного разряда низкого давления в радиальном магнитном поле для получения ускоренного потока ионов: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.08 / Задириев Илья Игоревич. – М., 2017. – 130 с.*
3. Савинов В.П. *Физика высокочастотного емкостного разряда*. М.: Физмалит, 2013 – 308 с.
4. Александров, А. Ф., Кузелев М. В. *Теоретическая плазменная электроника: учебное пособие* — М.: МГУ имени М. В. Ломоносова, Физический факультет, 2011. — 167 с.
5. Jorns B. A., Cusson S. E., Brown Z., Dale E. *Non-classical electron transport in the cathode plume of a Hall effect thruster* // Physics of Plasmas. – v.27 – №2 – 2020

6. Jorns B. *Predictive, data-driven model for the anomalous electron collision frequency in a Hall effect thruster* // Plasma Sources Sci. Technol. – v.27 – №10 – 2018