

На правах рукописи

УДК 537.534.2

Манегин Денис Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ И ВЫХОДНОГО
ИОННОГО ПОТОКА БЕССЕТОЧНЫХ ИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ
ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ**

Специальность 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Ивахненко Сергей Геннадьевич**
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Плазменные энергетические
установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Официальные оппоненты: **Кулевой Тимур Вячеславович**
доктор технических наук, заместитель
руководителя Комплекса по прикладным научным
исследованиям и экспериментальным установкам
НИЦ «Курчатовский институт»

Ризаханов Ражудин Насрединович
кандидат физико-математических наук, старший
научный сотрудник, начальник отдела
нанотехнологий АО ГНЦ «Центр Келдыша»

Ведущая организация: АО «НИИ НПО «ЛУЧ»

Защита диссертации состоится «09» декабря 2025 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.331.17 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. 947л.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.17, также просим отправлять электронные копии отзывов на электронную почту kharit@bmstu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н.



Харитонов С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы. Одним из важных этапов многих технологических процессов оптической, микроэлектронной и радиоэлектронной отраслей промышленности является ионно-лучевая обработка поверхности изделия. С помощью ускоренных ионных потоков возможны такие операции как тонкая очистка поверхности от загрязнений, формирование наноразмерного рельефа или модификация свойств осаждаемого функционального покрытия. В последнее время в качестве инструментов проведения данных процессов широкое распространение получили так называемые бессеточные ионные источники (БИИ). Это вид источников, использующих разряд со скрещенными электрическим и магнитным полями и известных в зарубежных публикациях как End-Hall. Анодная полость у БИИ имеет форму конуса, расширяющегося в сторону среза источника, что позволяет обеспечивать сильно расходящийся ионный пучок. Плотности ионного тока в пучке в среднем составляют порядка нескольких А/м^2 при энергиях ионов до 300 эВ.

На данный момент существует две основные конструктивные схемы бессеточных ионных источников: с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры. Первая схема, также называемая схемой с отражателем, появилась раньше и является наиболее распространённой как с точки зрения количества производимых источников, так и с точки зрения количества разработанных моделей. В то же время бессеточные ионные источники с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры также активно применяются в промышленности, отличаясь простотой конструкции. При этом детального сравнения параметров источников, выполненных по разным схемам, фактически никогда не проводилось.

Из-за этого неясны наиболее подходящие области применения каждой из конструктивных схем. В зависимости от конкретной задачи к бессеточному ионному источнику могут предъявляться особые требования как с точки зрения основных характеристик пучка, включая достигаемые значения плотности ионного тока и средней энергии ионов, так и с точки зрения более специфических параметров. Последнее может подразумевать, например, простоту эксплуатации в условиях производства, минимизацию загрязнения обрабатываемой поверхности продуктами эрозии элементов конструкции источника или ограничения на величину рабочего давления в вакуумной камере. В свою очередь, для выявления различий в перечисленных параметрах бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры необходимо провести сравнение их работы и происходящих при этом процессов в заведомо равных условиях.

Цель работы: определение предпочтительных областей применения бессеточных ионных источников, выполненных по конструктивным схемам с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры, на основе исследования параметров плазмы и выходного ионного потока.

Основными задачами, решаемыми в данной работе, являлись:

- изучение влияния конструктивной схемы и режима работы бессеточного ионного источника на параметры выходного ионного потока и скорость травления мишеней;
- разработка расчётной модели поведения заряженных частиц в разрядной камере бессеточного ионного источника;
- исследование влияния потенциала задней стенки разрядной камеры бессеточного ионного источника на поведение заряженных частиц в области горения разряда с помощью расчётной модели;
- выработка рекомендаций по областям применения бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры.

Методы исследований. В работе использованы экспериментальные и теоретические методы исследований. В экспериментальной части работы выполнено исследование разряда и выходного ионного потока бессеточных ионных источников для случаев плавающего и анодного потенциала задней стенки разрядной камеры. Экспериментально получены угловое распределение плотности выходного ионного потока, функция распределения ионов в пучке по энергиям и скорость ионного травления мишеней из нержавеющей стали для каждой из конструктивных схем. Также экспериментально произведено сравнение интенсивностей распыления элементов конструкции бессеточных ионных источников, выполненных по схемам с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры. На основе экспериментальных данных рассчитаны значения полного ионного тока и средней энергии ионов в пучке для каждого из рассмотренных режимов работы. С помощью теоретических расчетных методов проведено численное моделирование поведения заряженных частиц в разряде бессеточного ионного источника и объяснена разница в достигаемых значениях параметров выходного ионного потока для случаев плавающего и анодного потенциала задней стенки разрядной камеры.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- показано, что бессеточные ионные источники с плавающим потенциалом задней стенки разрядной камеры характеризуются в среднем в 2 раза повышенными значениями плотности тока и энергии ионов в пучке по сравнению со схемой с анодным потенциалом задней стенки при одинаковой геометрии камеры, равных величинах индукции магнитного поля и одинаковых параметрах разряда;
- показано, что величина плавающего потенциала задней стенки разрядной камеры бессеточного ионного источника определяется по большей части работой внешнего источника электронов и плазмообразующим газом;
- разработана расчётная модель, описывающая поведение заряженных частиц в разрядных камерах бессеточных ионных источников с учётом применяемой конструктивной схемы – с плавающим или с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры;
- с помощью расчётной модели обосновано, что эффективность генерации и ускорения ионов в бессеточных ионных источниках с анодным потенциалом

задней стенки разрядной камеры может быть повышена до уровня схемы с плавающим потенциалом в случае выпуклой формы задней стенки;

- предложена конструкция бессеточного ионного источника, отличающаяся тем, что позволяет без замены анода реализовать в рамках одного устройства как схему с плавающим потенциалом задней стенки разрядной камеры, так и схему с анодным потенциалом задней стенки.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется:

- применением отработанных и общераспространённых в ионно-плазменной технологии методов исследований;

- использованием в ходе экспериментов поверенной измерительной аппаратуры, внесённой в Государственный реестр средств измерений Российской Федерации;

- сопоставлением полученных автором расчетно-экспериментальных данных с опубликованными в рецензируемых научных изданиях положениями и результатами исследований.

Практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

- результаты работы позволяют выделить области практического применения для конструктивных схем бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры;

- разработанная расчётная модель поведения заряженных частиц в разрядной камере бессеточного ионного источника позволяет прогнозировать влияние параметров работы и конфигурации разрядной камеры на характеристики выходного ионного потока;

- предложенная конструкция бессеточного ионного источника, защищённая патентом № 2024125730, позволяет использовать одну модель источника для работы как с плавающим, так и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры.

Реализация результатов работы. Работа выполнялась на кафедре «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приведённые в диссертации результаты получены при выполнении госзадания на опытно-конструкторскую работу «Разработка бессеточных источников ионов для воздействия на материалы в условиях высокого вакуума» в рамках Соглашения № 075–03-2024-090 от 17.01.2024 и Дополнительного соглашения № 075–03-2024-090/6 от 21.05.2024 между Министерством науки и высшего образования и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Выполнено внедрение результатов диссертационной работы в учебный процесс кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Полученные результаты используются в лекциях по ряду дисциплин кафедры. Результаты работы были использованы при разработке бессеточных ионных источников серии «БИИ», прошедших полный цикл государственных испытаний с присвоением литеры «О1».

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования влияния конструктивной схемы и режима работы бессеточного ионного источника на параметры выходного ионного потока и скорость ионного травления мишеней;

– расчётная модель поведения заряженных частиц в разрядной камере бессеточного ионного источника;

– результаты теоретического исследования влияния потенциала задней стенки разрядной камеры бессеточного ионного источника на поведение заряженных частиц в области горения разряда;

– области применения бессеточных ионных источников, выполненных по схемам с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры.

Личный вклад автора. Представленные результаты диссертационной работы получены лично автором или при его равноправном участии:

- экспериментально получены зависимости параметров разряда от расхода газа и диапазоны работы бессеточных ионных источников, выполненных по конструктивным схемам с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры;

- экспериментально получены угловые профили распределения плотности ионного тока, а также функции распределения ионов по энергиям в пучках бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры;

- проведены экспериментальные измерения скорости травления мишеней из нержавеющей стали ионными пучками бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры;

- проведено экспериментальное сравнение интенсивностей распыления элементов конструкции бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры;

- разработана расчётная модель поведения заряженных частиц в разрядной камере бессеточного ионного источника;

- определены области применения бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры;

- принято участие в разработке бессеточного ионного источника, позволяющего работать как с плавающим, так и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы представлялись на:

1. Научно-техническом семинаре кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2025 году.

2. Двадцать восьмой всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых учёных (Новосибирск, 1-6 апреля 2024 года).

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 4 статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ (общий объем опубликованных работ – 2,65 п.л./1,50 п.л.), 1 тезисы доклада на конференции.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Объем работы 149 страниц, 129 страниц основного текста, 92 рисунка и 7 таблиц. Список литературы состоит из 170 источников информации, приведенных на 18 страницах. Информация о

внедрении результатов работы в учебный процесс и в опытное проектирование размещена в Приложении на 2 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, кратко изложена научная новизна полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор работ, посвящённых бессеточным ионным источникам различных конфигураций. Описаны принципы работы и основные конструктивные признаки наиболее распространённой схемы бессеточных ионных источников с плавающим потенциалом задней стенки разрядной камеры, а также альтернативной схемы, в которой задняя стенка находится под потенциалом анода.

Важность и перспективность работ по исследованию параметров плазмы и выходного ионного потока бессеточных ионных источников подтверждена трудами зарубежных авторов, включая Г.Р. Кауфмана, У.Г. Сейнти, В.В. Журина, Р.Р. Уилли, Н. Оудини, Д.А. Голосова, С.М. Завадского и др., а также отечественных ученых В.Г. Жупанова, И.С. Гайнутдинова, Е.В. Ключева, А.С. Золкина, А.С. Токарева, О.А. Лапшиной, А.А. Козырева и др.

Показано, что области эффективного применения двух описанных схем не до конца ясны. Характеристики бессеточных ионных источников с отражателем на данный момент изучены хорошо – в частности, величина тока ионов в пучке составляет от двадцати до тридцати процентов от тока разряда при средней энергии около шестидесяти процентов от разрядного напряжения. В то же время исследования, содержащие характеристики бессеточных ионных источников с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры, отличаются неполными данными об условиях проведения эксперимента. Таким образом, показано, что провести полноценное сравнение двух конструктивных схем бессеточных ионных источников с выделением ключевых областей возможного применения исключительно на основе опубликованных к настоящему времени материалов затруднительно.

Во второй главе описаны экспериментальные методики и оборудование, использовавшиеся при изучении параметров работы бессеточных ионных источников.

Описаны опытные образцы бессеточных ионных источников, разработанные в МГТУ им. Н.Э. Баумана на основе схем с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры и использовавшиеся при проведении экспериментов. Источники были обозначены как БИИ-10отр и БИИ-10ан соответственно. Опытные образцы характеризовались одинаковой геометрией разрядной камеры и эквивалентными магнитными системами. Инициация и поддержание горения разряда, а также нейтрализация ионного пучка осуществлялись с помощью термоэмиссионного газоразрядного катода-нейтрализатора. Бессеточные ионные источники были испытаны в диапазоне разрядных токов до 10 А и в диапазоне разрядных напряжений до 200 В.

Приводится описание экспериментального стенда, использовавшегося для исследования опытных образцов бессеточных ионных источников. В ходе работы регистрировались параметры разряда в БИИ, а также проводились зондовая диагностика ионного пучка и ионное травление мишеней из нержавеющей стали с последующим измерением скорости травления. Схема экспериментальных исследований представлена на Рис. 1.

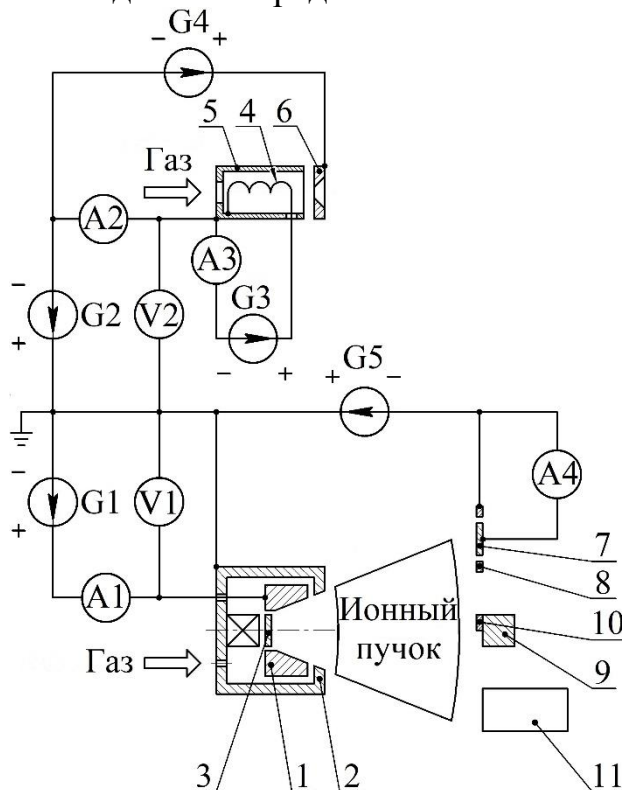


Рис. 1. Схема экспериментальных исследований бессеточных ионных источников: 1 – анод, 2 – магнитопровод, 3 – задняя стенка разрядной камеры, 4 – эмиттер, 5 – корпус катода, 6 – поджигающий электрод, 7 – коллектор зонда Фарадея, 8 – охранный кольцо, 9 – распыляемая мишень, 10 – маска, 11 – электростатический энергоанализатор

Исследования углового распределения ионного тока в пучке проводилось с помощью плоского зонда Фарадея с охранным кольцом. Зонд располагался на поворотном кронштейне, ось поворота которого лежала в плоскости среза ионного источника. Для учёта влияния вторичных низкоэнергетических ионов на результаты эксперимент проводился дважды: с коллектором зонда, направленным в сторону ионного источника, и с зондом, установленным перпендикулярно изначальное положение. Исследования функции распределения ионов по энергиям в пучке проводились с помощью электростатического сеточного энергоанализатора. Приводится описание использовавшегося энергоанализатора. Глубина травления поверхности распыляемой мишени, не закрытой маской, измерялась с помощью профилометра KLA Tencor Alpha-Step D 600 и использовалась при расчёте скорости ионного травления.

Приводится описание эксперимента по сравнению интенсивности распыления элементов конструкции бессеточных ионных источников путём спектроскопии ближних областей ионных пучков. Данные, получаемые с помощью спектрометра Optosky АТР3040, сопоставлялись с наиболее интенсивными пиками спектров излучения элементов, входящих в состав конструкционных материалов разрядных камер обоих ионных источников. Поэлементный состав материалов был получен с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра Bruker S1 Titan LE. На основе данного сопоставления оценивалось влияние распыления конструкции ионного источника на обрабатываемую в пучке поверхность в зависимости от конструктивной схемы.

Третья глава посвящена исследованию характеристик бессеточных ионных источников, выполненных по схемам с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры. Показано, что значения расхода газа, необходимые для достижения одних и тех же величин разрядного напряжения, в случае БИИ-10ан в разы меньше, чем в случае БИИ-10отр. Минимальные значения разрядного напряжения также оказались меньше для бессеточного ионного источника с анодным потенциалом задней стенки. При этом рабочие области двух опытных образцов практически не пересекались, как это показано на Рис. 2.

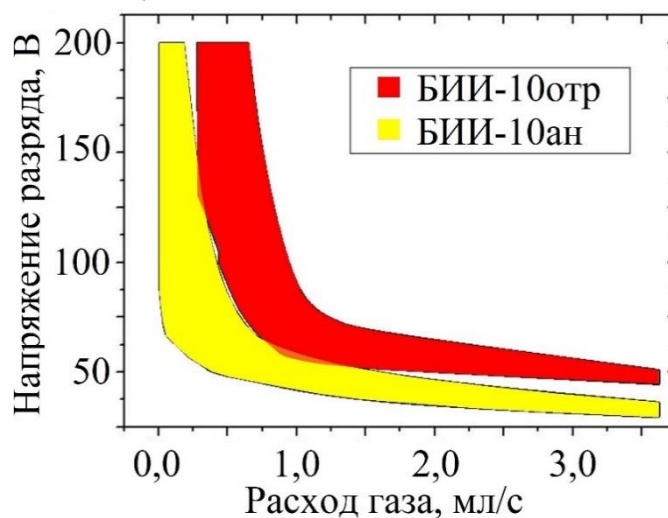


Рис. 2. Области работы БИИ-10отр и БИИ-10ан на аргоне в диапазоне токов разряда от 1 до 10 А

Приводятся результаты измерений углового распределения плотности тока ионов в пучке. На Рис. 3, а представлены соответствующие данные для напряжения разряда 150 В. Показано, что в случае БИИ-10отр значения в области оси ионного источника в среднем в 2,6 раз больше, чем в случае БИИ-10ан. Интегральные значения ионного тока в пучке находились в близком соотношении. В среднем его доля от тока разряда составляла около 0,4 в случае БИИ-10отр, что лишь немного превышает типичные значения для данной конструктивной схемы. В случае БИИ-10ан аналогичная доля составляла около 0,2. Также приводятся полученные тормозные характеристики и соответствующие им функции распределения ионов по

энергиям для пучков обоих опытных образцов. Показано, что для БИИ-10отр характерно выделение явного пика распределения в области 0,8 от разрядного напряжения, в то время как для БИИ-10ан преобладающим является низкоэнергетический пик в пределах 50 эВ, а остальная часть спектра практически равномерна. Пример сопоставления вида функций распределения ионов по энергиям при токе разряда 7,5 А и напряжении разряда 150 В представлен на Рис. 3, б. Изменение величины тока разряда при неизменном напряжении не оказывало влияния на вид зависимости в случае обоих опытных образцов. Средняя энергия ионов при этом составляла от 0,61 до 0,71 от разрядного напряжения в случае БИИ-10отр, в то время как для БИИ-10ан – от 0,36 до 0,43. Таким образом, показано, что для бессеточных ионных источников с плавающим потенциалом задней стенки разрядной камеры при равных условиях свойственен более интенсивный и высокоэнергетический пучок, чем для источников с анодным потенциалом задней стенки.

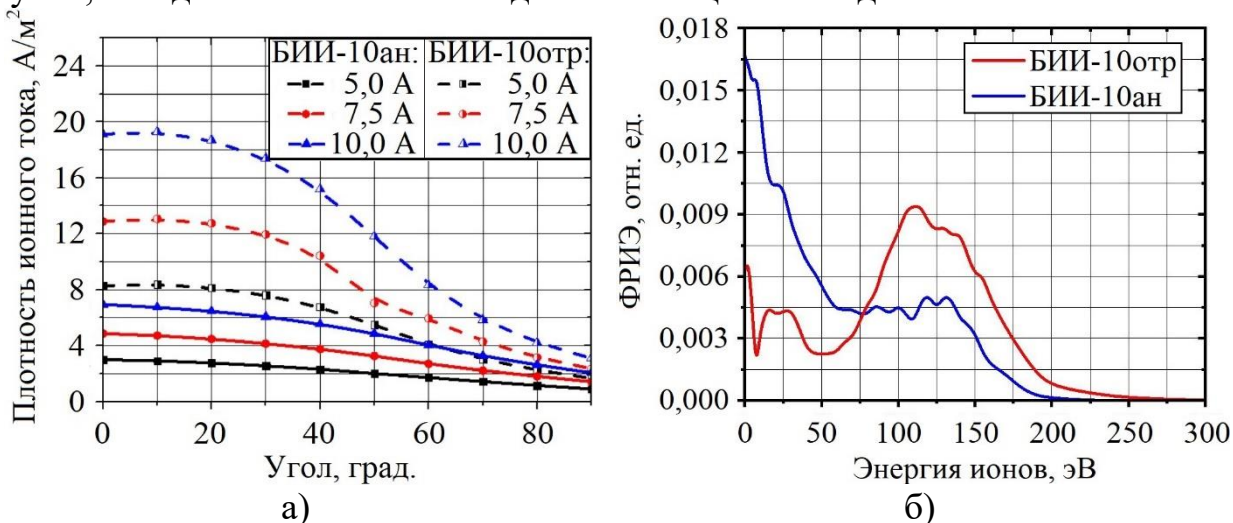


Рис. 3. Параметры ионных пучков бессеточных ионных источников при напряжении разряда 150 В: а) – угловые распределения плотностей ионного тока; б) – функции распределения ионов по энергиям при токе разряда 7,5 А

Это подтверждалось разницей в скоростях ионного травления, полученных при обработке в пучках БИИ мишеней из нержавеющей стали. Показано, что скорость травления для БИИ-10отр при одинаковых параметрах разряда значительно превышает аналогичную величину в случае БИИ-10ан. Максимальная зафиксированная разница составила 42,4 раза в случае тока разряда 10 А и напряжения разряда 150 В. Близкие значения скоростей ионного травления для двух рассматриваемых схем БИИ наблюдались лишь в том случае, когда и напряжение, и ток разряда БИИ с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры были в два раза выше аналогичных параметров БИИ с отражателем.

Режимы работы с равными скоростями ионного травления использовались при проведении спектрометрии ближних областей пучков бессеточных ионных источников. В этом случае потоки распылённого материала внутренней оснастки и стенок вакуумной камеры, попадающего в разрядные

камеры опытных образцов, были эквивалентны. Разница в условиях горения разряда, обусловленная выбранными режимами работы БИИ, учитывалась с помощью разработанной в АО «ЦНИИмаш» методики анализа эрозии электроракетных двигателей. В результате разница в значениях спектральной интенсивности излучения ближних областей ионных пучков БИИ-10отр и БИИ-10ан была обусловлена в первую очередь различиями в концентрациях элементов, распыляемых с поверхностей элементов конструкций ионных источников. Это, в свою очередь, позволило судить о соотношении интенсивностей данного процесса для БИИ с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры. На Рис. 4 приведён пример полученных спектров в диапазоне длины волны от 430 до 490 нм. Показано, что в данном диапазоне в случае БИИ-10отр значения спектральной интенсивности излучения ближней области пучка существенно превышали результаты для БИИ-10ан при длине волны, соответствующей наиболее характерным линиям собственного излучения хрома и никеля. Указанные элементы являлись основными легирующими компонентами в составе стали, из которой, в частности, были изготовлены задние стенки разрядных камер обоих ионных источников. Делается вывод о том, что БИИ с плавающим потенциалом задней стенки разрядной камеры свойственно более интенсивное распыление элементов конструкции. Это было подтверждено визуальным осмотром, проведённым после продолжительной работы источников, в ходе которого были обнаружены заметные следы эрозии поверхности отражателя. В то же время на поверхностях разрядной камеры БИИ-10ан следов эрозии не наблюдалось. На основе полученных результатов делается вывод о том, что работа бессеточных ионных источников с анодным потенциалом задней стенки разрядной камере сопровождается сниженным загрязнением поверхности, обрабатываемой ионным пучком, продуктами распыления элементов конструкции.

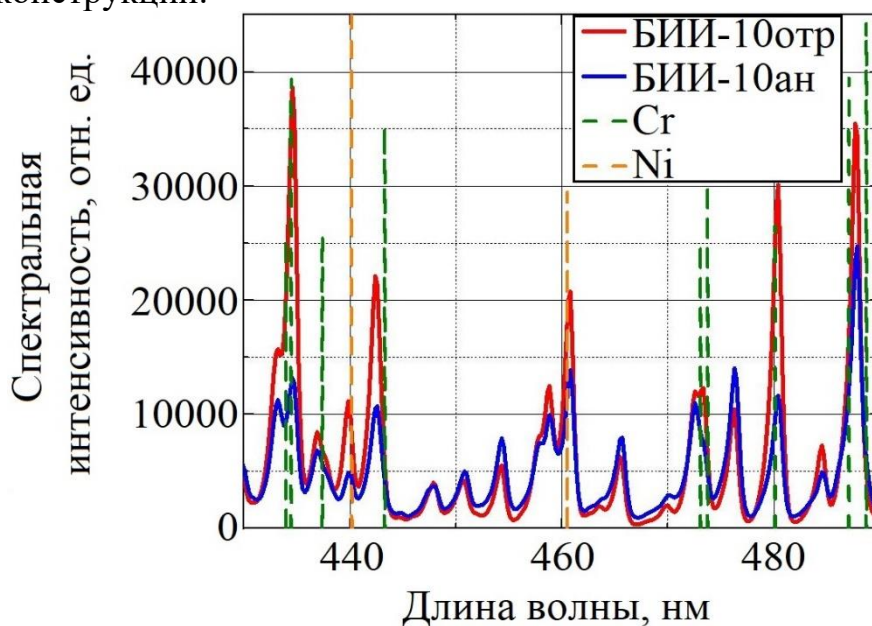


Рис. 4. Спектры излучения ближних областей ионных пучков бессеточных ионных источников при эквивалентных скоростях травления

Делается вывод о том, что основным распыляющимся элементом в разрядной камере БИИ-10отр является отражатель вследствие сниженных относительно анода значений плавающего потенциала. Приводятся результаты прямого измерения потенциала отражателя в ходе работы БИИ-10отр. Показано, что наибольшее влияние на величину потенциала отражателя оказывают рабочий газ и отношение тока эмиссии с катода к разрядному току. Графики указанных зависимостей представлены на Рис. 5, а. Под током эмиссии при этом подразумевается ток, протекающий в цепи смещения катода и характеризующий поток эмитируемых электронов. С увеличением данной величины, а также с ростом атомной массы рабочего газа величина потенциала отражателя падает. При небольших по сравнению с током разряда токах эмиссии потенциал отражателя сильно зависит от величины последних, в то время как в случае равенства или превышения разрядного тока зависимость носит слабый характер. Также показано, что параметры разряда мало влияют на величину потенциала отражателя. В случае работы на аргоне, принимаемые им значения лежали в диапазоне от 20 до 30 В при типичных для БИИ-10отр токах разряда от 5 до 10 А и напряжениях разряда от 100 до 200 В. Соответствующие данные представлены на Рис. 5, б. Отмечается, что полученные данные в совокупности со спектрометрическими исследованиями ионных пучков БИИ с отражателем могут использоваться для прогнозирования ресурса последнего.

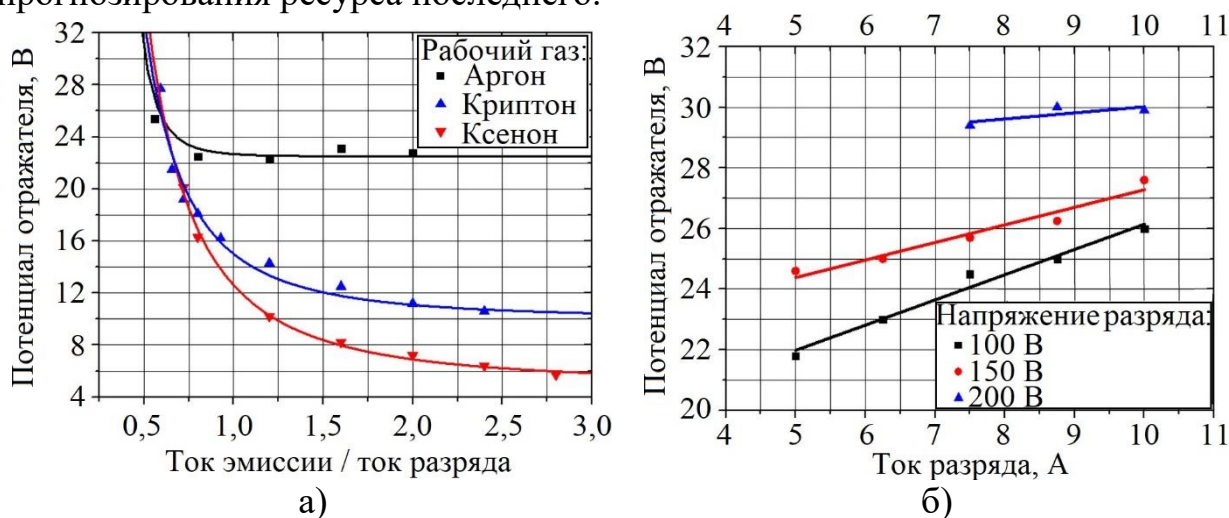


Рис. 5. Величина плавающего потенциала отражателя БИИ-10отр: а) – в зависимости от рабочего газа и условий работы катода; б) – в зависимости от параметров разряда для скомпенсированного пучка

На основе полученных в главе результатов сделан предварительный вывод о том, что при одинаковой геометрии разрядной камеры и одинаковых магнитных системах бессеточные ионные источники с отражателем отличаются большей универсальностью и гораздо лучше справляются с задачами, требующими повышенных скоростей ионного травления. В то же время бессеточные ионные источники с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры хорошо подходят для задач низкоэнергетического

ассистирования, а также для обработки чувствительных к загрязнениям и внешним воздействиям образцов.

В четвёртой главе описана разработанная расчётная модель поведения заряженных частиц в разрядной камере бессеточного ионного источника. Распределения величины индукции магнитного поля и концентрации нейтральных атомов плазмообразующего газа n_a были определены предварительно. Моделирование поведения заряженных частиц проводится с помощью гидродинамического приближения в двумерной осесимметричной постановке задачи. Для определения пространственного распределения величины электрического потенциала φ решается уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{q_e}{\varepsilon_0} (n_e - n_i). \quad (1)$$

где q_e – заряд, ε_0 – электрическая постоянная, n_e – концентрация электронов, n_i – концентрация ионов.

В качестве первого приближения уравнение (1) решается с учётом условия квазинейтральности, когда концентрации электронов n_e и концентрации ионов n_i равны. После этого в соответствии с начальными распределениями концентрации n_e и температуры электронов T_e и с учётом подвижности μ_e определяются потоки:

$$\Gamma_e = \mu_e n_e \nabla \varphi - \frac{2}{3q_e} \mu_e \nabla (n_e k_B T_e), \quad (2)$$

где k_B – постоянная Больцмана.

Затем решается уравнение неразрывности с учётом объёмной скорости ионизации $n_a n_e \langle \sigma_{ion} V_e \rangle$:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \text{div}(\Gamma_e) = n_a n_e \langle \sigma_{ion} V_e \rangle. \quad (3)$$

где σ_{ion} – сечение процесса ионизации, V_e – скорость электрона.

Полученное в результате решения уравнения (3) распределение концентрации электронов используется при решении уравнения энергии:

$$\frac{\partial (n_e k_B T_e)}{\partial t} + \frac{5}{3} \text{div}(\Gamma_e k_B T_e) - \text{div}(\chi_t \nabla T_e) = e \nabla \varphi \Gamma_e - W. \quad (4)$$

где χ_t – коэффициент теплопроводности, W – потери мощности.

При решении уравнения (4) учитываются объёмные потери мощности W на неупругие процессы ионизации и возбуждения атомов рабочего газа. Соответствующие константы скоростей процессов $\langle \sigma_{ion} V_e \rangle$ и $\langle \sigma_{exc} V_e \rangle$ определяются на основе предположения о максвелловском распределении электронов по скоростям V_e и данных о сечениях σ_{ion} и σ_{exc} .

Учитывается тензорный характер величин подвижности электронов μ_e и коэффициента теплопроводности χ_t , значения которых снижены в направлении, поперечном ходу силовых линий магнитного поля. При этом обе величины, как и их компоненты, зависят от частоты соударений ν_e , в результате которых электрон может переместиться перпендикулярно силовой линии. В расчёте данной величины учитываются три процесса: упругие соударения электронов с нейтральными атомами рабочего газа,

ионизационные столкновения и неоклассическая диффузия Бома. Первые две составляющие частоты ν_e равны $n_a \langle \sigma_{e-a} V_e \rangle$ и $n_a \langle \sigma_{ion} V_e \rangle$ соответственно. Константа скорости процесса упругого рассеяния, как и в случае с неупругими процессами, рассчитывается из предположения о максвелловском распределении электронов. Частота диффузии Бома обратно пропорциональна циклотронной частоте электрона ω_{ce} с коэффициентом, значение которого для случая ионных источников со скрещенными электрическим и магнитным полями эмпирически устанавливается на уровне одной сотой.

С учётом этого система (1–4) решается методом конечных элементов. Затем на основе данных об объёмной скорости ионизации $n_a n_e \langle \sigma_{ion} V_e \rangle$ в уравнение Пуассона (1) вводится корректировка, связанная с локальным неравенством концентраций электронов и ионов.

В пятой главе приводятся результаты моделирования поведения заряженных частиц в разрядных камерах БИИ-10отр и БИИ-10ан. Показано, что, несмотря на близкий характер распределения таких параметров как концентрация и температура электронов, объёмная скорость ионизации при одинаковых параметрах разряда в случае БИИ-10отр была в среднем в 2 раза больше, чем в случае БИИ-10ан. Соответствующие примеры распределения представлены на Рис. 6, а и Рис. 6, б. При этом отмечается, что основная зона ионизации в случае БИИ-10ан смещена в сторону задней стенки разрядной камеры по сравнению с БИИ-10отр. Количество ионов, вычисленное путём интегрирования распределения объёмной скорости ионизации на фиксированном временном промежутке, практически в 2 раза превышало аналогичную величину для БИИ-10ан. Это коррелирует с наблюдавшейся экспериментально разницей в величинах ионного тока пучков БИИ.

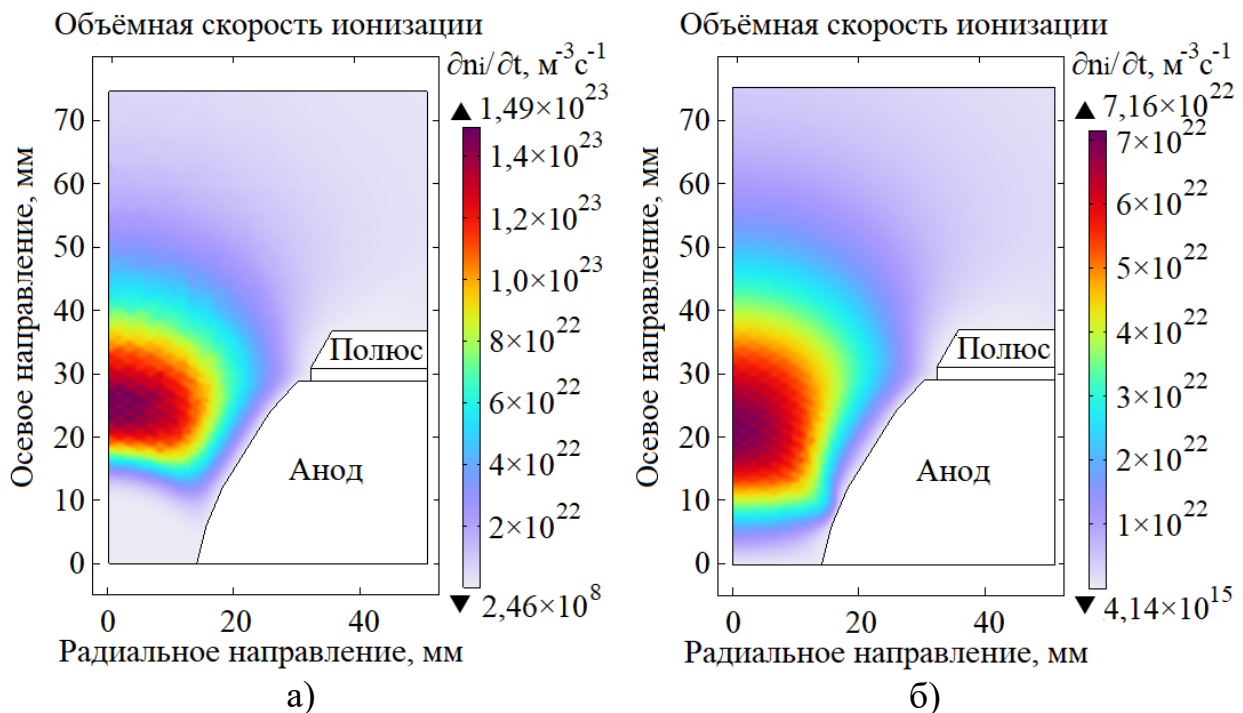


Рис. 6. Результаты расчёта объёмной скорости ионизации в разрядной камере: а) – БИИ-10отр; б) – БИИ-10ан

Показано, что распределения формирующих пучок ионов в разрядных камерах БИИ в зависимости от ускоряющей разности потенциалов близки по характеру к виду экспериментально полученных функций распределения ионов по энергиям в пучке. В случае БИИ-10отр наблюдается выраженный пик распределения, соответствующий разности потенциалов около 0,8 от разрядного напряжения, что находится в хорошем соответствии с экспериментом. В то же время в случае БИИ-10ан пик менее интенсивен и характеризуется большей шириной, а само распределение отличается повышенной по сравнению с БИИ-10отр равномерностью. Пример полученных результатов при токе разряда 7,5 А и напряжении разряда 200 В представлен на Рис. 7. Таким образом, уже на этапе формирования пучка для БИИ-10ан характерны в среднем меньшие энергии ионов. Предполагается, что из-за процесса резонансной перезарядки вид распределения по мере удаления ионов от места рождения будет меняться с тенденцией к увеличению доли низкоэнергетической составляющей и выделением соответствующего пика.

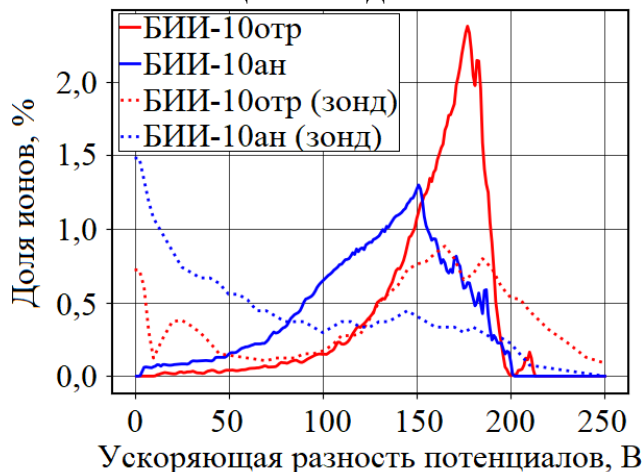


Рис. 7. Распределение ионов в разрядных камерах бессеточных ионных источников в зависимости от ускоряющей разности потенциалов

Приводятся несколько путей повышения характеристик выходного ионного потока бессеточных ионных источников с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры. Наиболее простым способом повышения объёмной скорости ионизации и, как следствие, плотности тока ионов в пучке стало увеличение индукции магнитного поля. Это ограничило поток электронов на боковую поверхность анода, сконцентрировав их в центральной части разрядной камеры. Расчётное значение количества образовавшихся за единицу времени ионов в этом случае было практически равно аналогичной величине для БИИ-10отр. Однако, энергетические характеристики формирующегося пучка при этом ухудшились. Наиболее эффективным решением оказалась альтернативная компоновка разрядной камеры, в которой задняя стенка выполнена выпуклой. В этом случае, как и при повышении индукции магнитного поля, электронная концентрация в центральной области разрядной камеры локально увеличивается, что приводит к повышению объёмной скорости ионизации (Рис. 8, а и Рис. 8, б). Количество ионов,

образовавшихся за единицу времени, в случае выпуклой задней стенки под анодным потенциалом превысило результат для случая БИИ с отражателем.

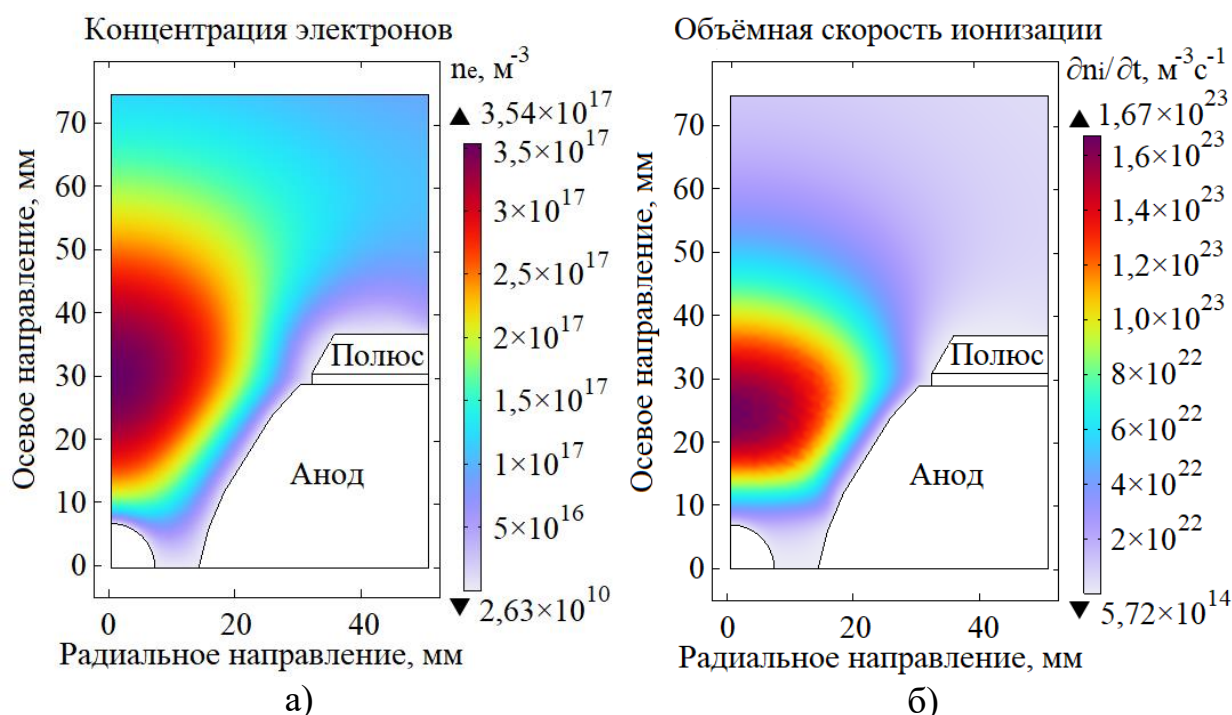


Рис. 8. Распределение по разрядной камере БИИ-10ан с выпуклой задней стенкой: а) – концентрации электронов; б) – объёмной скорости ионизации

Показано, что выполнение задней стенки разрядной камеры выпуклой оказывает существенное влияние на распределение ионов в разрядной камере в зависимости от ускоряющей разности потенциалов (Рис. 9). Пик распределения в этом случае становится более чётко выраженным и характеризуется повышенными значениями доли ионов. Показано, что это связано с переносом зоны высоких значений потенциала ближе к области ионизации в совокупности с увеличением объёмной скорости ионизации.

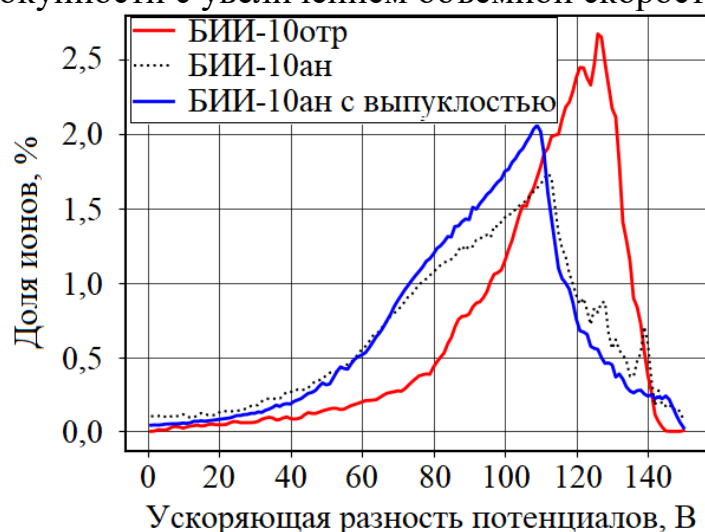


Рис. 9. Распределение ионов в разрядных камерах бессеточных ионных источников, в зависимости от ускоряющей разности потенциалов при выпуклой задней стенке БИИ-10ан

По результатам экспериментальных и теоретических исследований формулируются наиболее перспективные области применения для бессеточных ионных источников обеих конструктивных схем. Схема с отражателем подходит для широкого спектра задач, включая требующие работы с высокими мощностями разряда. За счёт большой плотности ионного тока и повышенных значений средней энергии ионов в пучке для процессов интенсивного ионного травления также лучше подходит именно эта конструктивная схема. Возможность работы с низкими мощностями без охлаждения формирует дополнительную нишу применения в компактных и ограниченных с точки зрения коммуникаций системах. Бессеточные ионные источники с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры плоской формы лучше подходят для тонких процессов, где высокие значения скорости ионного травления не так важны, либо губительны для обрабатываемой поверхности. Сниженная интенсивность распыления элементов конструкции также позволяет проводить процессы, для которых загрязнение обрабатываемой поверхности продуктами распыления нежелательно. В то же время при дополнительной оптимизации магнитного поля и наличии выпуклости на задней стенке данная схема становится эквивалентной по своим характеристикам источникам с отражателем, выгодно отличаясь сниженными расходами рабочего газа, упрощённым техническим обслуживанием и отсутствием расходуемых элементов конструкции.

Дополнительно приводится описание конструкции задней стенки разрядной камеры бессеточного ионного источника, позволяющей переходить от схемы с отражателем к схеме с анодным потенциалом без замены анода. Указанное решение позволяет выполнять весь спектр рассмотренных в главе задач с помощью одной модели БИИ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОODY ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Экспериментальным путём показано, что для бессеточных ионных источников с плавающим потенциалом задней стенки разрядной камеры значения плотности ионного тока, а также полного ионного тока не менее чем в 2 раза выше, чем для источников с анодным потенциалом задней стенки при равных условиях. В случае анодного потенциала задней стенки наблюдаются энергии ионов в пучке со средним значением 0,37 до 0,43 от разрядного напряжения. Для схемы с отражателем энергии ионов в среднем в 1,65 раз больше.

2. Разработана расчётная модель поведения заряженных частиц в разрядных камерах бессеточных ионных источников, позволяющая определить соотношение характеристик выходного ионного потока для конструктивных схем с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры.

3. С помощью расчётной модели показано, что при одинаковых условиях источник с отражателем характеризуется в среднем в 2 раза большими значениями объёмной скорости ионизации по сравнению с источником с

анодным потенциалом задней стенки, что приводит к аналогичному соотношению для величин ионного тока в пучках. Из-за компактного расположения зоны интенсивной ионизации в области значений потенциала около 0,8 от разрядного напряжения также наблюдается более эффективное ускорение ионной компоненты. Распределение формирующих пучок ионов в зависимости от ускоряющей разности потенциалов характеризуется в среднем в 1,7 раз большей долей ионов в пике вблизи разрядного напряжения, чем в случае источников с анодным потенциалом задней стенки. Показано, что выявленная разница с точки зрения характеристик выходного ионного потока может быть преодолена для бессеточного ионного источника с анодным потенциалом задней стенки в случае выпуклой формы последней.

4. Выделены основные области применения различных схем бессеточных ионных источников. Источники с отражателем эффективны в случае технологических процессов с энергиями ионов более 50 эВ, и выгодно отличаются сниженными в 2 раза требованиями к системе охлаждения. Источники с анодным потенциалом задней стенки плоской формы оптимальны для работы с чувствительными к загрязнениям и повреждениям образцами при энергиях ионов от 5 до 50 эВ. Источники с анодным потенциалом задней стенки выпуклой формы практически эквивалентны источникам с отражателем и более выгодны в условиях большого количества загрузок обрабатываемых образцов.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Исследование параметров работы бессеточных ионных источников / Д.С. Манегин [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. № 12 (144). 12 с. (0,75 п.л./0,25 п.л.).

2. Исследование ионных пучков бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры / Д.С. Манегин [и др.] // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 4. С. 158-167. (0,60 п.л./0,25 п.л.).

3. Энергетические характеристики пучков бессеточных ионных источников / Д.С. Манегин [и др.] // Радиотехника. 2024. Т. 88., № 11. С. 172-180. (0,60 п.л./0,30 п.л.).

4. Манегин Д.С. Влияние параметров работы бессеточного ионного источника на величину потенциала отражателя // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2025. Т. 26., № 2. 11 с. (0,70 п.л./0,70 п.л.).

5. Результаты испытаний бессеточных ионных источников модифицированной конструкции / Д.С. Манегин [и др.] // Двадцать восьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-28). Материалы конференции. Сборник тезисов докладов. Новосибирск. 2024. С 111-112. (0,10 п.л./0,05 п.л.).