



*На правах рукописи*

АБРАМОВ Илья Сергеевич

**ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПОТОКОВ  
НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ  
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ В УСЛОВИЯХ  
МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА**

1.3.9 – физика плазмы

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН, Нижний Новгород)

Научный руководитель Шалашов Александр Геннадиевич,  
доктор физико-математических наук, доцент,  
зав. сектором 172 СВЧ методов нагрева плазмы,  
ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии  
наук» (г. Нижний Новгород)

Официальные оппоненты Попов Алексей Юрьевич,  
доктор физико-математических наук,  
зав. лабораторией теоретического моделирования  
плазменных процессов, ФГБУН Физико-технический  
институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии  
наук (г. Санкт-Петербург);

Солдаткина Елена Ивановна,  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории 9-1 «Газо-  
динамическая ловушка», ФГБУН Институт ядерной  
физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Рос-  
сийской академии наук (г. Новосибирск)

Ведущая организация ФГБУН Федеральный исследовательский центр  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Рос-  
сийской академии наук» (г. Москва)

Защита состоится “13” декабря 2021 г. в 15 часов на заседании дис-  
сертационного совета 24.1.238.01 в Институте прикладной физики РАН  
(603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института  
прикладной физики РАН ([ipfran.ru](http://ipfran.ru)).

Автореферат разослан “ ” ноября 2021 г.

Ученый секретарь специализированного совета  
доктор физико-математических наук



Э. Б. Абубакиров

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Нагрев плазмы электромагнитным излучением позволяет эффективно вкладывать энергию в электронную компоненту – за счет существенной разницы в массах электроны во внешнем электрическом поле набирают энергию значительно быстрее ионов [1]. Это приводит к образованию неравновесной плазмы, в которой электроны обладают намного большей кинетической энергией, чем ионы. Такая ситуация часто реализуется в условиях микроволнового нагрева плазмы, используемого в широком спектре приложений: термоядерных энергетических установках [2–4], источниках протонов [5], нейтронов [6], многозарядных ионов [7], плазмохимических реакторах [8–11]. Повышение эффективности поглощения и, как следствие, еще больший разрыв в энергиях электронов и ионов, могут быть обеспечены за счет резонанса внешнего поля с электронной компонентой плазмы. В зависимости от частоты излучения и параметров плазмы, выступающей в качестве объекта воздействия, тип резонанса может быть разным: плазменный резонанс в изотропной плазме, электронный циклотронный (ЭЦ), нижний и верхний гибридные резонансы с плазмой, удерживаемой в магнитных ловушках, различные варианты плазмонного резонанса, играющие важную роль при взаимодействии излучения с плазменным образованием, размеры которого сопоставимы с длиной волны.

В условиях резонансного микроволнового нагрева возможно увеличение средней энергии электронов до значений порядка потенциала ионизации ионов высоких кратностей, что приводит к возможности поддержания плазмы многозарядных ионов, где ионы с более высоким зарядом появляются в результате воздействия энергичных электронов неравновесной плазмы на уже (в том числе – многократно) ионизированные частицы. Примером использования данного физического механизма являются ионные источники на основе ЭЦ разряда, разработанные для генерации ионов высокой кратности для ускорителей тяжелых ионов [7, 12, 13]. Помимо ионизации, энергичные электроны обеспечивают также эффективное возбуждение ионов. Вследствие этого в резонансном микроволновом разряде линейчатое излучение возбужденных ионов часто является основным каналом радиационных потерь энергии, превалируя над тормозным излучением электронов и рекомбинационным излучением [14].

С повышением кратности иона спектр его линейчатого излучения смещается в более коротковолновую область. В спектрах ионов высокой кратности ряда химических элементов, таких как олово (Sn) и ксенон (Xe), присутствует значительное количество линий в районе 10–15 нм [15, 16]. Диапазон, отвечающий этой области спектра, называется или мягким рентгеновским, или экстремальным ультрафиолетовым (ЭУФ).

Излучение в данном диапазоне имеет важное значение для современной индустрии полупроводников. Например, применение излучения с длиной волны 10–15 нм при экспонировании открывает возможность кратного увеличения разрешающей способности проекционной литографии [17–19].

Использование мощных гиротронов микроволнового и терагерцового диапазонов для поддержания резонансного разряда позволяет получить плазму с уникальными параметрами, выгодными с точки зрения генерации ЭУФ излучения. В ИПФ РАН в начале 1990-х было предложено применить такой разряд в качестве источника излучения на длинах волн порядка 10 нм [14]. Возможность этого была исследована экспериментально [20–23], были разработаны и запатентованы две концепции источника ЭУФ излучения:

- источник излучения в диапазоне  $13.5 \pm 1\%$  нм на основе микроволнового разряда в открытой магнитной ловушке, поддерживаемого в потоке паров олова [24];
- источник излучения в диапазоне  $11.2 \pm 1\%$  нм на основе субтерагерцового разряда в потоке ксенона, свободно расширяющегося в вакуумную камеру [25].

По сравнению с наиболее эффективными на момент написания диссертации источниками ЭУФ излучения, где многозарядная плазма создается в результате воздействия импульса лазерного излучения на каплю жидкого олова [26, 27], предложенные концепции источников ЭУФ излучения на основе микроволнового и субтерагерцового разрядов имеют ряд преимуществ:

- наличие выделенного направления движения плазмы позволяет предохранить оптику от губительного воздействия частиц рабочего вещества;
- в условиях резонансного поглощения электромагнитного излучения, средняя энергия электронов поддерживается на уровне, оптимальном для последовательной ионизации ионов до необходимых кратностей и возбуждения этих ионов электронным ударом;
- по сравнению с лазерами современные микроволновые приборы способны обеспечить более высокую среднюю мощность излучения, вплоть до сотен кВт, и более длительный импульс излучения, вплоть до работы в режиме стационарной генерации [28].

Первые эксперименты в рамках разработанных концепций источника ЭУФ излучения показали их состоятельность [29, 30], сформировав запрос на теоретическое исследование неоднородных потоков излучающей неравновесной плазмы многозарядных ионов в условиях резонансного микроволнового разряда, которое позволило бы ответить на вопрос об оптимальных условиях создания такой плазмы и эффективной генерации линейчатого излучения ионов высокой кратности. В настоящей диссертационной работе представлены результаты такого исследования.

## **Цель и задачи диссертационной работы**

Цель диссертационной работы – развитие теории стационарного течения неравновесной плазмы многозарядных ионов, поддерживаемой за счет резонансного нагрева ее электронов электромагнитным излучением микроволнового и субтерагерцового диапазонов. Целью диссертационной работы обусловлены следующие задачи:

1. Развитие общих теоретических методов для описания динамики потока неравновесной плазмы в условиях многократной ионизации электронным ударом.
2. Исследование эффекта запираания ультрафиолетового излучения в плотной плазме многозарядных ионов, поддерживаемой в условиях резонансного микроволнового разряда.
3. Исследование поглощения микроволнового излучения неоднородным потоком неравновесной плазмы.
4. Оптимизация источника экстремального ультрафиолетового излучения на основе микроволнового разряда в открытой магнитной ловушке, поддерживаемого в потоке паров олова
5. Оптимизация источника экстремального ультрафиолетового излучения на основе субтерагерцового разряда в потоке ксенона, свободно расширяющегося в вакуумную камеру.
6. Исследование расширения неравновесной плазмы с горячими электронами к проводящей стенке в спадающем магнитном поле.

## **Научная новизна проведенных исследований**

Научная новизна проведенных исследований состоит в следующем:

1. Построена гидродинамическая модель стационарного потока неравновесной плазмы с переменным ионным составом.
2. Произведена общая классификация возможных режимов течения неравновесной плазмы многозарядных ионов.
3. Предложена оригинальная техника решения стационарных гидродинамических уравнений для компонент неоднородной неравновесной плазмы в условиях многократной ионизации электронным ударом для течений, содержащих переход через звуковой барьер.
4. Развита методика к описанию линейчатого излучения оптически плотного образования неравновесной плазмы в условиях мультиплетного расщепления спектральных терм многозарядных ионов.
5. Установлены предельные параметры неравновесной многозарядной плазмы как источника ЭУФ излучения на основе микроволнового разряда в открытой магнитной ловушке, поддерживаемого в потоке вакуумно-дуговой плазмы олова. Вычислены достижимые КПД источников ЭУФ излучения на основе разрядов данного типа.

6. Установлены предельные параметры неравновесной многозарядной плазмы как источника ЭУФ излучения на основе субтерагерцового разряда в свободно расширяющемся потоке ксенона. Вычислены достижимые КПД источников ЭУФ излучения на основе разрядов данного типа.
7. Исследованы возможные режимы течения плазмы в присутствии наведенного внутреннего высокочастотного электромагнитного поля, усиленного вследствие дипольного резонанса с потоком плазмы, определены ключевые характеристики поглощения энергии внешнего поля.
8. Предложен метод самосогласованного описания устанавливающегося профиля потенциала неравновесной плазмы и направленной скорости ионов в расширителе открытой магнитной ловушки.

## **Методы и подходы, используемые в диссертации**

Исследования, представленные в диссертационной работе, в основе своей имеют описание многокомпонентной плазмы посредством системы гидродинамических уравнений, где функция источников частиц (ионов с разной кратностью ионизации) представляет из себя набор слагаемых, соответствующих последовательной ионизации электронным ударом.

Ультрафиолетовое излучение исследуемых плазменных образований описывается в рамках уравнения радиационного переноса возбуждения, предложенного Биберманом и Холстейном [31] и обобщенного на случай мультиплетного расщепления спектральных линий многозарядных ионов.

Нагрев потока плазмы многозарядных ионов излучением микроволнового или терагерцового диапазона частот описывается с учетом влияния электромагнитного поля на газодинамические характеристики потока за счет усредненной пондеромоторной силы, действующей со стороны этого поля на электроны плазмы. Для этого используется совместная система уравнений Максвелла и гидродинамических уравнений.

При рассмотрении потока неравновесной плазмы в расширителе открытой магнитной ловушки совместно с гидродинамическим описанием ионов для электронов используется решение бесстолкновительного кинетического уравнения в дрейфовом приближении, записываемое как произвольная функция двух интегралов движения – энергии электрона и магнитного момента его ларморовского вращения.

Указанные уравнения решаются как аналитически, так и с применением численных методов, в зависимости от цели рассмотрения и возможности аналитического решения.

## **Основные положения, выносимые на защиту**

1. В стационарном потоке многозарядной плазмы с переменным ионным составом звуковой переход осуществляется при ненулевом гра-

диенте площади поперечного сечения потока. Значение этого градиента определяется процессом последовательной ионизации в неоднородной плазме до звукового перехода. Вывод задачи о классическом сопле Лавала, заключающийся в том, что положение звукового перехода соответствует минимуму площади поперечного сечения потока, остается справедливым для предельного случая плазмы, состоящей из электронов и ионов с максимальной кратностью ионизации.

2. Непосредственно за пробкой газодинамической магнитной ловушки ускорение ионов при расширении плазмы в убывающем магнитном поле происходит за счет потока тепла из тела ловушки вследствие теплопроводности. При дальнейшем расширении, когда роль соударений ослабевает, ионы продолжают ускоряться за счет отбора энергии электронов, находящихся в области расширения. Таким образом, конвективные потери энергии и отвечающий им полный перепад потенциала определяются протяженностью области ускорения ионов в столкновительном режиме, в то время как ускорение ионов в области бесстолкновительного расширения слабо влияет на полный перепад потенциала, но определяет скачок потенциала в дебаевском слое у стенки.
3. При нагреве потока холодной неравновесной плазмы микроволновым излучением в условиях, когда поперечный размер потока мал по сравнению с длиной волны, возможно существенное усиление электромагнитного поля внутри плазмы на дипольном резонансе. В этом случае усредненная ponderomotive сила, действующая на электроны, препятствует увеличению плотности плазмы выше уровня, соответствующего дипольному резонансу, что приводит к увеличению области резонансного взаимодействия поля с плазмой и, как следствие, к увеличению эффективности поглощения микроволнового излучения.
4. Эффект запирания линейчатого ультрафиолетового излучения многозарядных ионов благородных газов, связанный с его резонансным перепоглощением и последующим гашением возбуждения иона электронным ударом, проявляется тем сильнее, чем меньше энергия соответствующего перехода. Спектр ионов высокой кратности представлен переходами с более высокой энергией, чем спектр ионов с меньшей кратностью ионизации. Поэтому, при определенном соотношении плотности и характерных размеров разряд может быть оптически тонким для линейчатого излучения с энергией кванта порядка 100 эВ, характерного для ионов высокой кратности и применяемого для ЭУФ литографии, в то время как линейчатое излучение ионов более низкой кратности ослаблено за счет эффекта запирания. Для разряда в ксеноне с характерными линейными размерами порядка

100 мкм плотности ионов  $10^{17}$ – $10^{18}$  см<sup>-3</sup> оптимальны для генерации излучения на длине волны  $11.2 \pm 1\%$  нм.

5. Для оптимизированного режима горения микроволнового разряда в потоке паров олова, распространяющегося в приосевой области открытой магнитной ловушки и нагреваемого излучением гиротронов, разработанных для поддержания плазмы в установках по исследованию управляемого термоядерного синтеза, расчетная мощность линейчатого излучения многозарядных ионов на длине волны  $13.5 \pm 1\%$  нм составляет до 40 кВт. Характерные параметры оптимизированного режима: концентрация электронов порядка  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>, длина порядка 20 см, поперечные размеры порядка 2 мм, поглощаемая мощность микроволнового излучения порядка 100 кВт, частота микроволнового излучения 170 ГГц, средняя энергия электронов порядка 50 эВ.
6. Для оптимизированного режима горения точечного разряда, поддерживаемого излучением субтерагерцовых гиротронов в свободно расширяющемся потоке ксенона, расчетная мощность линейчатого излучения многозарядных ионов на длине волны  $11.2 \pm 1\%$  нм составляет до 5 кВт. Характерные параметры оптимизированного режима: концентрация электронов порядка  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, линейные размеры порядка 100 мкм, поглощаемая мощность субтерагерцового излучения порядка 100 кВт, частота субтерагерцового излучения 670 ГГц, средняя энергия электронов порядка 100 эВ.

## Научная и практическая ценность

Научная и практическая значимость представленной в диссертационной работе теории определяется ее применимостью для интерпретации и оптимизации широкого спектра экспериментов по развитию приложений, отмеченных в разделе «Актуальность темы».

В случае экспериментов по исследованию источников плазмы многозарядных ионов и ЭУФ излучения из-за высокой плотности и малых объемов плазменных образований, используемых в этих целях, аппаратная диагностика внутренней структуры разрядов с многозарядными ионами, затруднена. Фактически, существует возможность следить лишь за интегральными характеристиками разряда: излучением в определенном диапазоне частот, усредненной интегральной плотностью и др. Однако с точки зрения оптимизации экспериментов важнейшими, но трудно измеримыми характеристиками разряда являются пространственное распределение ионов по кратностям ионизации и профиль скорости потока плазмы. Первое необходимо для определения области локализации и характеристик ультрафиолетового излучения отдельных ионных фракций, линии которых лежат в целевом диапазоне длин волн. Второе определяет паразитные с точки зрения создания источника потери за счет выноса

энергии из разряда вместе с потоком. Разработанная в диссертации модель течения плазмы многозарядных ионов позволяет по интегральным характеристикам разряда восстанавливать локальные его характеристики, моделировать наиболее перспективные экспериментальные сценарии при работе с конкретными химическими элементами и различными параметрами поддерживающего излучения. Модель была применена для интерпретации экспериментов 2012 г. в ИПФ РАН по реализации источника ЭУФ излучения на основе дополнительного нагрева потока вакуумно-дуговой плазмы Sn, распространяющегося в приосевой области открытой магнитной ловушки, при помощи микроволнового излучения гиротрона (75 ГГц); экспериментов 2018 г. в ИПФ РАН по поддержанию точечного разряда в свободно расширяющемся потоке Xe, излучающего в ЭУФ диапазоне длин волн и поддерживаемого гиротроном субтерагерцового диапазона (250 ГГц). Были восстановлены пространственные распределения ионов по кратностям ионизации, профили скорости потока и плотности плазмы, предложены варианты оптимизации экспериментов.

В случае с описанием движения неравновесной плазмы в расширителе крупномасштабных открытых магнитных ловушек, предназначенных для исследований в области УТС, ситуация в некотором смысле противоположная: из эксперимента мы знаем только локальные характеристики плазмы, однако сам эксперимент по их измерению трудоемкий и дорогостоящий. Разработанная теоретическая модель движения плазмы в расширителе ловушки является простой: вычисления на ее основе не ресурсозатратны, но позволяют по исходным характеристикам плазмы в основном объеме ловушки восстановить профили потенциала плазмы и скорости потока ионов в расширителе, определить скачок потенциала в двойном слое у собирающей плазму стенки, потери энергии в расчете на электрон-ионную пару и др. Модель была верифицирована на доступных экспериментальных данных, полученных в 2013–2014 гг. на установке ГДЛ в ИЯФ СО РАН, Новосибирск.

Представленная в работе теория интересна не только для развития приложений, но также с фундаментальной точки зрения. С ее помощью удалось обнаружить ряд новых физических эффектов. Наиболее важные из них указаны среди основных положений, выносимых на защиту.

### **Публикации, апробация работы**

Результаты диссертационной работы изложены в ведущих российских и зарубежных научных журналах: «Известия вузов. Радиофизика», Журнал экспериментальной и теоретической физики, *Physics of Plasmas*, *Physical Review Applied*, *Applied Physics Letters*, *Nuclear Fusion*. Всего по теме диссертации опубликовано 8 статей в реферируемых научных журналах, 9 статей в сборниках международных конференций и 10 тезисов докладов. Результаты диссертационной работы представлены автором лично в рамках 15 международных конференций, включая

Международную (Звенигородскую) конференцию по физике плазмы и УТС, European Physics Society Conference on Plasma Physics, International Conference «Frontiers of Nonlinear Physics».

### **Личный вклад автора**

Представленные в диссертации результаты получены автором лично либо при его определяющем участии. Автор внес вклад в каждый из этапов работы по их получению, включая совместную с научным руководителем и соавторами постановку задач, аналитические исследования потоков неравновесной плазмы, численное моделирование, верификацию результатов моделирования на доступных экспериментальных данных, использование разработанной теории для поиска оптимальных параметров плазмы для приложений.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка основных публикаций автора по теме работы и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 116 страниц, включая 42 рисунка, одну таблицу и список литературы из 87 наименований. Список основных публикаций автора по теме диссертации содержит 27 наименований.

## **Содержание диссертационной работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи диссертационной работы, отмечена научная новизна проведенных исследований, описаны использованные методы и подходы, приведены основные положения, выносимые на защиту, замечания о научной и практической ценности, краткое содержание диссертационной работы.

**Первая глава** посвящена теоретическому описанию динамики неоднородного потока неравновесной плазмы многозарядных ионов. Глава представляет собой последовательное изложение теории, являющейся результатом цикла работ 2015–2018 гг. [**1А**, **2А**, **3А**, **4А**]<sup>1</sup>, в наиболее актуальной к настоящему моменту редакции, используемой для интерпретации и оптимизации проводимых экспериментов по генерации ЭУФ излучения.

**В разделе 1.1** обсуждаются особенности исследуемого объекта – стационарного потока неравновесной плазмы микроволнового разряда. Ключевой из них является резонансный энерговклад в электронную компоненту. Он обеспечивает поддержание высокой, от нескольких десятков до сотен электронвольт, средней кинетической энергии (температуры)

<sup>1</sup>Ссылки с индексом **А** относятся к списку основных публикаций автора по теме диссертации, приведенного на страницах 18–20.

электронов, что позволяет при описании разряда пренебрегать давлением ионов по сравнению с электронным. Характерная длина теплопроводности электронов при этом существенно превышает размеры разряда, что позволяет считать температуру электронов однородной.

В результате удастся сформулировать систему гидродинамических уравнений стационарного квазиодномерного потока неравновесной плазмы многозарядных ионов в следующем виде:

$$\frac{d(Sn_j u)}{dz} = Sn_e(k_{j-1}n_{j-1} - k_j n_j), \quad \frac{d(Sm_i n u^2)}{dz} = -S \frac{d(n_e T_e + n_0 T_0)}{dz}.$$

Здесь  $z$  – координата вдоль потока,  $n_j$  – концентрация ионов с кратностью ионизации  $Z_j = j$  при  $j = 1, \dots, Z_{\max}$ , либо концентрация нейтральных атомов в случае  $j = 0$ ,  $Z_{\max}$  – максимальная кратность ионизации,  $m_i$  – масса иона,  $n$  – суммарная концентрация всех тяжелых фракций,  $n_e$  – концентрация электронов, определяемая из условия квазинейтральности,  $k_j$  – константы ионизации,  $T_e$  и  $T_0$  – температуры электронов и нейтральных атомов, соответственно,  $u$  – скорость потока,  $S = S(z)$  – площадь поперечного сечения потока, в представленной постановке полагаемая заданной. Выбор конкретной зависимости  $S(z)$ , позволяет моделировать разнообразные ситуации, встречающиеся в эксперименте.

**Раздел 1.2** посвящен движению неравновесной плазмы многозарядных ионов в окрестности звукового барьера, где приведенная система гидродинамических уравнений имеет особенность [1A]. Обсуждаются возможность и условия реализации гладкого перехода течения из дозвукового в сверхзвуковой режим и обратно на основе анализа линеаризованной системы гидродинамических уравнений стационарного квазиодномерного потока плазмы многозарядных ионов с упрощающим предположением о равенстве констант ионизации различных компонент плазмы электронным ударом. Произведена классификация возможных течений для расширяющегося потока плазмы многозарядных ионов.

**В разделе 1.3** рассмотрен наиболее важный для практики класс течений, содержащих переход через звуковой барьер [2A]. Для течений этого класса предложена техника решения гидродинамических уравнений, сформулированных в разделе 1.1, которая позволяет отделить задачу о балансе ионизации от задачи о балансе импульса и обойти трудности численного интегрирования уравнения баланса импульса в окрестности звукового перехода. Техника развита для произвольных констант ионизации, то есть обеспечивает возможность работы с реальными рабочими веществами источников ЭУФ излучения (Sn, Xe), приведены данные, которые необходимы для таких вычислений [3A, 4A].

**В разделе 1.4** обсуждаются основные энергетические характеристики потока неравновесной плазмы многозарядных ионов. Текст сгруппирован по трем подразделам. Первые два подраздела посвящены объем-

ным потерям энергии на ионизацию и излучение. Последний – конвективным потерям энергии.

**В подразделе 1.4.1** получено выражение для потерь энергии на ионизацию и излучение линейчатого спектра ионов в предельном случае оптически тонкой среды.

**В подразделе 1.4.2** предложено выражение для потерь энергии на излучение линейчатого спектра ионов в случае неравновесной плазмы произвольной оптической плотности, то есть в условиях возможного присутствия эффекта запираания излучения за счет его перепоглощения и последующего гашения возбуждения иона электронным ударом. Выражение получено на основе решения уравнения Бибермана-Холстейна, обобщенного на случай мультиплетного расщепления спектральных терм многозарядных ионов. Обсуждается влияние параметров линий и плазмы на выход излучения из объема разряда [4A]. Приводятся результаты исследований прозрачности плотного ксенонового плазменного образования с многозарядными ионами, имеющего размеры, характерные для экспериментов по развитию точечного источника ЭУФ излучения. Показано, что до плотностей порядка  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  плазма остается оптически прозрачной для целевого ультрафиолетового излучения в диапазоне  $11.2 \pm 1\%$  нм, в то время как линии с большей длиной волны уже активно запираются. Это позволяет сделать вывод о положительной роли эффекта запираания излучения в контексте разработки источников ЭУФ излучения.

**В подразделе 1.4.3** получено выражение для конвективных потерь энергии, то есть для энергии, покидающей разряд вместе с потоком частиц. Обсуждается роль конвективных потерь в балансе энергии разряда.

**В разделе 1.5** сформулирована замкнутая гидродинамическая модель квазиодномерного течения неравновесной плазмы многозарядных ионов, позволяющая по внешним параметрам, которыми являются полный поток частиц, исходный ионный состав потока, сообщаемая разряду мощность и зависимость площади поперечного сечения плазмы от координаты вдоль потока, восстанавливать температуру электронов в разряде, распределение в пространстве концентраций электронов и ионов, профиль скорости потока и ряд производных характеристик, включая мощность излучения плазмы в выделенной спектральной полосе [3A, 4A]. Замыкание уравнений производится в силу закона сохранения энергии, который позволяет определить температуру электронов как функцию сообщаемой разряду мощности.

**В разделе 1.6** на основе анализа зависимости характерного пространственного масштаба выравнивания температуры электронов за счет электронной теплопроводности от параметров плазмы установлены границы применимости приближения однородной температуры электронов, используемого в теории, представленной в предыдущих разделах [1A, 2A]. В частности, показано, что при характерных для неравно-

весного микроволнового разряда температурах электронов 50–100 эВ в рамках обеих существующих концепций источника ЭУФ излучения на основе резонансного микроволнового разряда пользоваться разработанной выше теорией можно до сравнительно высоких значений плотности плазмы: в случае нагрева плазмы олова в компактных магнитных ловушках предельно допустимыми являются плотности плазмы порядка  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , в случае свободно расширяющейся плазмы ксенона –  $10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Различие связано с различием в пространственных масштабах разрядов.

**В разделе 1.7** на основе сравнения длины ионизации нейтральных атомов и пространственных масштабов рассматриваемых разрядов сделан вывод о том, что как в случае с разрядом в магнитной ловушке, так и в случае с разрядом в свободно расширяющемся потоке, реализуется режим выгорания нейтральных частиц: даже в присутствии постоянного источника нейтральных атомов они ионизируются на периферии разряда и не проникают внутрь плазменного образования. Вследствие этого процесс перезарядки ионов на нейтральных атомах не оказывает существенного влияния на ионный состав разрядов.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена результатам использования представленной в предыдущей главе гидродинамической модели для интерпретации и оптимизации экспериментов по генерации ЭУФ излучения. В двух разделах главы представлены исследования по поиску оптимальных режимов горения разряда для двух разных концепций источника ЭУФ излучения: на основе микроволнового разряда в потоке паров олова, распространяющегося в присоединенной области открытой магнитной ловушки [3А], и субтерагерцового разряда в потоке ксенона, свободно расширяющегося в вакуумную камеру [4А, 5А].

**В разделе 2.1** приведено исследование источника ЭУФ излучения на основе микроволнового разряда в олове, поддерживаемого в открытой магнитной ловушке [3А]. На основе моделирования сделан вывод о том, что КПД и абсолютное значение мощности ЭУФ излучения в диапазоне  $13.5 \pm 1\%$  нм для данного источника на нынешнем уровне развития микроволновых приборов могут быть довольно высокими: до 30% и 40 кВт, соответственно. Однако в силу слабой локализации излучающей области (порядка 10 см для использованных в пионерских экспериментах магнитных ловушек) сфокусировать для дальнейшего использования возможно лишь небольшую часть сгенерированного целевого ЭУФ излучения. Предложена оптимизированная магнитная конфигурация, позволяющая уменьшить протяженность излучающей области до 1 см при сохранении мощности ЭУФ излучения. Характеристики данного разряда приведены на рис. 1.

**В разделе 2.2** рассмотрен источник ЭУФ излучения на основе компактного (точечного) субтерагерцового разряда в расширяющемся потоке ксенона [4А]. При помощи моделирования установлены оптимальные значения параметров экспериментов по генерации ЭУФ излучения

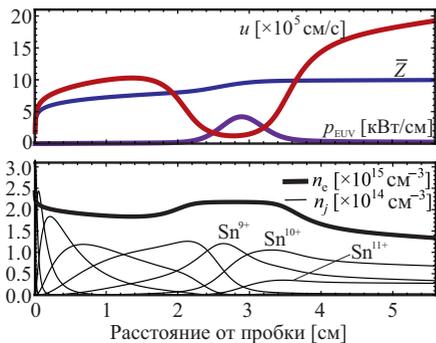


Рис. 1. Параметры разряда в олове, поддерживаемого внутри открытой магнитной ловушки, как функции координаты вдоль оси ловушки (нулю соответствует положение магнитной пробки). Верхний график: линейная плотность мощности  $p_{\text{EUV}}$  излучения в диапазоне  $13.5 \pm 1\%$  нм, скорость потока плазмы  $u$ , и средний заряд ионов  $\bar{Z} = n_e/n$ . Нижний график: концентрации электронов  $n_e$  и плотности ионных фракций  $n_j$ . Диаметр плазмы в пробке 2 мм, длина ловушки 5.6 см, пробочное отношение 9. Температура электронов  $T_e = 50$  эВ.

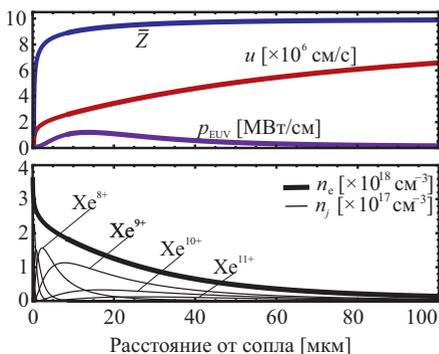


Рис. 2. Параметры разряда в расширяющемся потоке ксенона как функции расстояния от сопла. Обозначения те же, что на рис. 1, но линейная плотность мощности излучения  $p_{\text{EUV}}$  соответствует диапазону  $11.2 \pm 1\%$  нм. Диаметр сопла 70 мкм. Температура электронов  $T_e = 100$  эВ.

в диапазоне  $11.2 \pm 1\%$  нм и приведены сценарии режимов горения точечного разряда с эффективностью генерации до 9% (4.5% по отношению к мощности гиротрона) и абсолютной мощностью целевого излучения до 9 кВт. Однако данные выводы предполагают, что давление внутри сопла составляет более 9 атм, а это труднодостижимо в эксперименте. При атмосферном давлении внутри сопла расчетная максимальная мощность ЭУФ излучения составила 5 кВт при КПД 5%. Характеристики данного разряда приведены на рис. 2.

В завершение раздела представлены результаты интерпретации экспериментов 2018 г. по генерации ЭУФ излучения локализованным разрядом в потоке ксенона, поддерживаемым излучением гиротрона 250 ГГц/250 кВт [5A]. По измеренным интегральной мощности излучения наблюдаемого разряда и мощности его излучения в нескольких выделенных спектральных диапазонах на основе моделирования установлены распределение ионов разряда по кратностям ионизации, вклад каждой из ионных фракций в излучение разряда, концентрации электронов и ионов, как функции расстояния от сопла.

**В третьей главе** предложена самосогласованная модель квазиодномерного стационарного потока неравновесной плазмы, распространяющегося вдоль оси открытой магнитной ловушки и поддерживаемого вы-

сокочастотным электромагнитным полем [6A]. Модель позволяет исследовать возможные режимы течения плазмы в присутствии наведенного внутреннего высокочастотного поля, усиленного вследствие дипольного резонанса с потоком плазмы. В главе рассмотрена простейшая задача о потоке плазмы с фиксированной (единичной) кратностью ионизации без учета радиационных потерь. Однако «электродинамическая» часть задачи не зависит от этих особенностей. Поэтому предложенный формализм допускает обобщение и на случай плазменного потока более сложного (переменного) ионного состава с потерями на линейчатое излучение ионов, при этом остаются верными основные качественные выводы, сделанные в данной главе.

**Разделы 3.1–3.4** посвящены построению упомянутой самосогласованной модели. В ее основе лежат гидродинамические уравнения и аналитическое решение задачи о рассеянии электромагнитной волны плазменным цилиндром с диаметром, малым по сравнению с длиной волны. Найденное в результате решения электромагнитное поле в среде используется для нахождения усредненной пондеромоторной силы, действующей на электроны плазмы, которая в свою очередь влияет на характеристики потока. Таким образом, в нашем распоряжении оказывается замкнутая модель для согласованного описания течения плазмы и процесса резонансного поглощения электромагнитного излучения.

**В разделах 3.4–3.7** на основе результатов моделирования произведена классификация возможных течений и установлена интересная особенность нелинейного поглощения излучения на дипольном резонансе: за счет того, что пондеромоторная сила препятствует повышению концентрации электронов сверх резонансного значения, при увеличении мощности микроволнового излучения увеличивается область резонансного взаимодействия этого излучения с потоком. Это приводит к тому, что поглощаемая мощность растет с увеличением плотности энергии внешнего поля быстрее, чем по линейному закону, то есть нелинейность увеличивает эффективность поглощения.

**Четвертая глава** посвящена исследованию течения неравновесной плазмы за пробкой открытой магнитной ловушки (в расширителе) [7A]. Здесь в фокус исследования попадает более широкий диапазон плотностей и температур плазмы, а также коэффициентов расширения потока, поскольку расширение плазмы по пути к коллектору за пробкой ловушки используется не только в приложениях по созданию источников частиц и излучения, но и в больших ловушках для плазмы с субтермоядерными параметрами. В связи с таким обобщением, математический аппарат описания динамики потока плазмы подвергается модификации: в отличие от примененного в предыдущих главах полностью гидродинамического описания, в этой главе мы будем учитывать кинетические эффекты, связанные с изменением функции распределения электронов плазмы по скоростям по мере расширения потока.

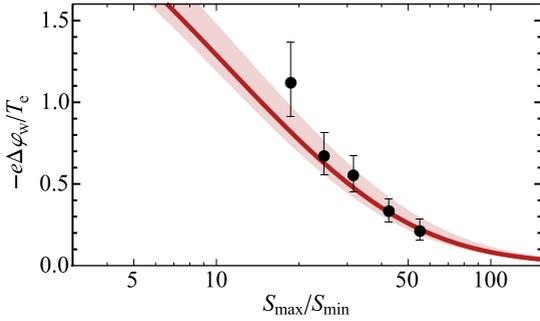


Рис. 3. Зависимость скачка потенциала у стенки расширителя  $-e\Delta\varphi_w/T_e$  от максимального коэффициента расширения  $S_{\max}/S_{\min}$ . Рассмотрен интервал температур ионов  $0 < T_i < T_e$  обозначенный затененной областью вокруг центральной кривой  $T_i = 0.6T_e$ . Точки с диапазонами погрешностей отвечают экспериментальным результатам, полученным для плазмы, нагреваемой нейтральным инжектором, на установке ГДЛ:  $T_i \sim 120$  эВ,  $T_e$  изменяется от 100 до 200 эВ для различных  $S_{\max}/S_{\min}$  согласно рис. 3 работы [32], данные об измерениях потенциала взяты из рис. 5 той же работы.

**В подразделах 4.1.1–4.1.3 раздела 4.1** представлена гибридная модель течения неравновесной плазмы. Ионы в этой модели описываются при помощи гидродинамических уравнений. Характер течения электронов различается в области плотной плазмы, примыкающей к магнитной пробке, и области разреженной плазмы у собирающей стенки (коллектора плазмы). В представленной модели мы абстрагируемся от описания переходной области, полагая нулевой ее толщину и непрерывно сшивая характеристики плазмы в этом сечении. В области, примыкающей к пробке, электроны описываются гидродинамически. В области, примыкающей к коллектору плазмы используется кинетическое описание при помощи уравнения Больцмана для функции распределения электронов. В итоге удастся сформулировать замкнутую систему уравнений и граничных условий для описания течения неравновесной плазмы в расширителе магнитной ловушки.

**В подразделе 4.1.4** обсуждается возможность описания скачка потенциала плазмы в двойном слое у собирающей плазму стенки в рамках разработанной модели.

**В разделах 4.2 и 4.3** представлены, соответственно, аналитические оценки характеристик и результаты моделирования режимов течения плазмы в расширителе газодинамической магнитной ловушки на основе предложенной системы уравнений. Модель верифицирована на экспериментальных данных об измерении скачка потенциала в двойном слое у коллектора плазмы, полученных ранее на установке ГДЛ в ИЯФ СО РАН, Новосибирск (рис. 3). На основе моделирования установлено, что только столкновительный изотермический разлет плазмы вблизи магнитной пробки напрямую влияет на продольные потери энергии. Эффект

не сильно выражен в крупных термоядерных установках, но может существенно повлиять на удержание плотной плазмы в компактных устройствах, таких как плазменные источники многозарядных ионов. С другой стороны, увеличение модуля падения потенциала плазмы, вызванное увеличением продольных потерь энергии, может улучшить удержание электронов, в том числе за счет увеличения популяции запертых частиц. Это позволяет, например, рассматривать возможность использования в приложениях ЭЦР-разряда в конфигурации с одной магнитной катушкой, когда удержание электронов в убывающем магнитном поле происходит исключительно за счет амбиполярного потенциала.

**В заключении** подведены итоги диссертационной работы.

## Основные результаты работы

1. Развита теория стационарного течения неравновесной плазмы в условиях многократной ионизации. Предложена эффективная техника поиска решения уравнений теории.
2. Построена модель линейчатого излучения в ультрафиолетовом диапазоне оптически плотного образования неравновесной плазмы многозарядных ионов с учетом мультиплетного расщепления спектральных терм.
3. Установлены предельные параметры неравновесной многозарядной плазмы для двух существующих концепций источника ЭУФ излучения: на основе микроволнового разряда в открытой магнитной ловушке, поддерживаемого в потоке паров олова, и на основе разряда в свободно расширяющемся потоке ксенона.
4. Исследованы режимы течения неравновесной плазмы, каналируемой внешним магнитным полем, в присутствии наведенного внутреннего высокочастотного электромагнитного поля, усиленного вследствие дипольного резонанса с потоком плазмы. Определены характеристики поглощения энергии электромагнитного поля плазмой в условиях возникающей нелинейности.
5. Разработан метод описания течения неравновесной плазмы в расширителе открытой магнитной ловушки, позволяющий рассчитывать профили потенциала плазмы и направленной скорости ионов самоогласованным образом.
6. Установлена зависимость скачка потенциала в двойном слое у коллектора плазмы от его положения в расширителе открытой газодинамической магнитной ловушки и параметров удерживаемой в ловушке плазмы.

## Список работ по теме диссертации

- [1A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *О формировании многозарядной плазмы в направленном потоке газа.* // Известия вузов. Радиофизика. 2015. Т. **58** (12). С. 1022-1043.
- [2A] Шалашов А. Г., Абрамов И. С., Голубев С. В., Господчиков Е. Д. *Теория стационарного СВЧ разряда с многозарядными ионами в расширяющейся струе газа.* // ЖЭТФ. 2016. Т. **150** (2). С. 254-267.
- [3A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. *Prospects of extreme ultraviolet radiation sources based on microwave discharge for high-resolution lithography.* // Phys. Plasmas. 2017. Vol. **24**. P. 073511(8).
- [4A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. *Extreme-ultraviolet light source for lithography based on an expanding jet of dense xenon plasma supported by microwaves.* // Phys. Rev. Applied 2018. Vol. **10**. P. 034065(11).
- [5A] Shalashov A. G., Vodopyanov A. V., Abramov I. S., Sidorov A. V., Gospodchikov E. D., Razin S. V., Chkhalo N. I., Salashchenko N. N., Glyavin M. Yu., and Golubev S. V. *Observation of extreme ultraviolet light emission from an expanding plasma jet with multiply charged argon or xenon ions.* // Appl. Phys. Lett. 2018 Vol. **113**. P. 153502(5).
- [6A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Нелинейное взаимодействие СВЧ-излучения с потоком плазмы в условиях гибридного резонанса.* // ЖЭТФ. 2019. Т. **156** (3). С. 528-539.
- [7A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shaposhnikov R. A. and Shalashov A. G. *Effect of ion acceleration on a plasma potential profile formed in the expander of a mirror trap.* // Nucl. Fusion. 2019. Vol. **59**. P. 106004(9).
- [8A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Источник экстремального ультрафиолетового излучения на основе разряда, поддерживаемого импульсом излучения терагерцевого лазера на свободных электронах.* // ЖЭТФ. 2021. Т. **159** (2). С. 270-280.
- [9A] Shalashov A. G., Golubev S. V., Abramov I. S., Gospodchikov E. D. *Formation of UV-radiating strongly non-equilibrium plasma with multiply charged ions in the expanding high-pressure gas jet.* // AIP Conference Proceedings. 2016 Vol. **1771**. P. 070001(4).
- [10A] Shalashov A. G., Abramov I. S., Golubev S. V., Gospodchikov E. D. *Microwave discharge with multiply charged ions in expanding gas jet as a point source of UV radiation.* // Proc. 43rd European Physical Society Conference on Plasma Physics in Leuven, Belgium, July 4 – 8, 2016. P. 1.111(4).
- [11A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D. and Shalashov A. G. *Theory of resonant stationary discharge with multiply charged ions in plasma flow propagating in mirror magnetic trap.* // EPJ Web of Conferences. 2017. Vol. **149**. P. 02024(2).
- [12A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D. and Shalashov A. G. *Modelling of EUV light sources based on microwave discharge in inhomogeneous flow of nonequilibrium plasma with multiply charged tin and xenon ions.* // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. **187**. P. 01001(2).
- [13A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G., Sidorov A. V., Vodopyanov A. V. *Source of extreme ultraviolet light based on expanding jet of*

- dense plasma supported by microwaves: theory and modeling.* // Proc. 45th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Prague, Czech Republic, July 2 – 6, 2018. P. 2.3021(4).
- [14A] Abramov I. S., Shaposhnikov R. A., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. *Ion acceleration in a non-equilibrium plasma flow expanding from a magnetic mirror.* // Proc. 46th European Physical Society Conference on Plasma Physics, Milan, Italy, July 8 – 12, 2019. P. 4.4004(4).
- [15A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. *Multi-charged plasma flow as a source of UV radiation.* // Proc. 9th Int. Workshop «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications», Nizhny Novgorod, July 24-30, 2014. P. 91-92.
- [16A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *О формировании плазмы многозарядных ионов в направленном потоке газа.* // Тезисы докладов XLII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 9- 13 февраля 2015. С. 232.
- [17A] Шалашов А. Г., Господчиков Е. Д., Абрамов И. С. *Теория стационарного СВЧ разряда с многозарядными ионами в расходящейся струе газа.* // Тезисы докладов XLIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 8-12 февраля 2016. С. 267.
- [18A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Локализованный разряд в плотной ксеноновой плазме как точечный источник жесткого ультрафиолетового излучения.* // Тезисы докладов XLIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 8-12 февраля 2016. С. 237.
- [19A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. *Formation of XUV-radiating strongly non-equilibrium plasma with multiply charged ions in the expanding high-pressure gas jet.* // Proc. VI International Conference «Frontiers of Nonlinear Physics», N.Novgorod – St. Peterburg, Russia, July 17-23, 2016. P. 247-248.
- [20A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Теория стационарного СВЧ-разряда в потоке неоднородной неравновесной плазмы многозарядных ионов.* // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. 2018. Т. 2. С. 4.
- [21A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Источник ЭУФ излучения на основе стационарного СВЧ разряда в потоке многозарядной плазмы переменного сечения.* // Тезисы докладов XLV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2-6 апреля, 2018. С. 216.
- [22A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Нелинейное взаимодействие СВЧ излучения с потоком плазмы в условиях верхнего гибридного резонанса.* // Тезисы докладов XLVI Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 18-22 марта, 2019. С. 176.
- [23A] Абрамов И. С. *Теория стационарного СВЧ-разряда в потоке неоднородной неравновесной плазмы многозарядных ионов.* // XXIV Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные и математические науки): материалы докладов. 2019. С. 86.

- [24A] Abramov I. S., Gospodchikov E. D., Shalashov A. G. *Nonlinear absorption of microwaves in bounded plasma flow.* // Proc. VII International Conference «Frontiers of Nonlinear Physics», N.Novgorod, Russia, June 28 – July 4, 2019. P. 193-194.
- [25A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Локализованный ТГц разряд, поддерживаемый излучением ЛСЭ: моделирование пробоя и режимов горения.* // Тезисы докладов XLVII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 16-20 марта, 2020. С. 159.
- [26A] Абрамов И. С., Шапошников Р. А., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Влияние ускорения ионов на профиль потенциала в расширителе открытой магнитной ловушки.* // Тезисы докладов XLVII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 16-20 марта, 2020. С. 78.
- [27A] Абрамов И. С., Господчиков Е. Д., Шалашов А. Г. *Разряд, поддерживаемый импульсом излучения лазера на свободных электронах, как источник экстремального ультрафиолетового излучения.* // Тезисы докладов XLVIII Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. Звенигород, 15-19 марта, 2021. С. 153.

## Цитированная литература

- [1] Райзер Ю. П. *Физика газового разряда.* – Долгопродный: Издательский дом «Интеллект», 2009. – 736 с.
- [2] Bagryansky, P. A., Shalashov A. G., Gospodchikov E. D. et al. // PRL – 2015. – Vol. **144**. – P. 205001.
- [3] Wolf R. C., Bozhenkov S., Dinklage A. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion – 2019. – Vol. **61**. – P. 014037.
- [4] Batanov G. M., Borzosekov V. D., Kovrizhnykh L. M. et. al. // Plasma Physics Reports – 2013. – Vol. **39**. – P. 444-455.
- [5] Skalyga V., Izotov I., Sidorov A. et al. // Journal of Instrumentation. – 2012. – Vol. **7**. – P. P10010.
- [6] Golubev S., Skalyga V., Izotov I. and Sidorov A. // Journal of Instrumentation. – 2017. – Vol. **12**. – P. T02003.
- [7] Водопьянов А. В., Голубев С. В., Мансфельд Д. А. и др. // ЖТФ. – 2005. – Т. **75**. – С. 101-105.
- [8] Артемьев К.В., Батанов Г.М., Давыдов А.М. и др. // Физика плазмы. – 2021. – Vol. **47** (5). – С. 476-489.
- [9] Артемьев К.В., Батанов Г.М., Бережецкая Н.К. и др. // Физика плазмы. – 2021. – Vol. **47** (4). – С. 379-382.
- [10] Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Lobaev M.A., Radishev D.B. // Diamond and Related Materials. – 2018. – Vol. **83**. – P. 8-14.
- [11] Akhmadullina N.S., Skvortsova N.N., Obratsova E.A. et al. // Chemical Physics. – 2019. – Vol. **516**. – P. 63-70.
- [12] Geller R. *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas.* – London: London Institute of Physics Publishing, 1996.
- [13] Zhao H. W., Sun L. T., Guo J. W. et al. // Rev. Sci. Instrum. – 2018. – Vol. **89**. – P. 052301.

- [14] Голубев С. В., Зорин В. Г., Платонов Ю. Я., Разин С. В. // Письма в ЖТФ. – 1994. – Vol. **20** (4). – С. 7-11.
- [15] White J., Hayden P., Dunne P. et al. // J. Appl. Phys. – 2005. – Vol. **98**. – P. 113301.
- [16] Churilov S. S., Joshi Y. N., Reader J., Kildiyarova R. R. // Physica Scripta – 2004. – Vol. **70**. – P. 126-138.
- [17] Bakshi V. *EUV Lithography*. – Bellingham, WA: SPIE, 2018.
- [18] Wagner C., and Harned N. // Nature Photonics. – 2010. – Vol. **4**. – P. 24-26.
- [19] Chkhalo N. I. and Salashchenko N. N. // AIP Adv. – 2013. – Vol. **3**. P. 082130.
- [20] Golubev S. V., Razin S. V., Vodopyanov A. V., Zorin V. G. // Fusion technology. – 1999. – Vol. **35**. (1T) – P. 288-291.
- [21] Водопьянов А. В., Голубев С. В., Зорин В. Г. и др. // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. **26** (24). – С. 7-12.
- [22] Golubev S. V., Razin S. V., Semenov V. E. et al. // Review of Scientific Instruments. – 2000. – Vol. **71**. (2) – P. 669-671.
- [23] Водопьянов А. В., Голубев С. В., Мансфельд Д. А. и др. // Письма в ЖЭТФ. – 2008. – Т. **88**. – С. 103-106.
- [24] Патент №2523445, Российская Федерация, МПК H05G2/00 H01G21/027. Способ получения направленного экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения для проекционной литографии высокого разрешения и источник направленного ЭУФ излучения для его реализации: №2012131070/07 : заявл. 19.07.2012 : опубл. 20.07.2014 / Водопьянов А. В., Голубев С. В., Литвак А. Г. и др.; заявитель и патентообладатель ИПФ РАН. – 15 с.
- [25] Патент №2633726, Российская Федерация, МПК H05G2/00 G03F7/20. Устройство получения направленного экстремального ультрафиолетового излучения с длиной волны  $11.2 \text{ нм} \pm 1\%$  для проекционной литографии высокого разрешения : №2016119288 : заявл. 18.05.2016 : опубл. 17.10.2017 / Водопьянов А. В., Глявин М. Ю., Мансфельд Д.А. и др.; заявитель и патентообладатель ИПФ РАН. – 15 с.
- [26] Brandt D. C., Fomenkov I., Stewart J. // Proc. SPIE 11323, EUV Lithography XI. – 2020. – P. 113230W.
- [27] Mizoguchi H., Nakarai H., Abe T. et al. // Proc. SPIE 11323, EUV Lithography XI. – 2020. – P. 113230X.
- [28] Thumm M. // Karlsruhe Institute of Technology Scientific Reports – 2016. – Vol. **7735**. – 179 p.
- [29] Chkhalo N. I., Golubev S. V., Mansfeld D. et al. // J. Micro/Nanolithogr. MEMS, and MOEMS. – 2012. – Vol. **11**. – P. 021123-1.
- [30] Glyavin M. Y., Golubev S. V., Izotov I. V. et al. // Appl. Phys. Lett. – 2014. – Vol. **105**. – P. 174101.
- [31] Радиационный перенос возбуждения // Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. / Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. – М: Наука, 1982. – С. 74-90.
- [32] Soldatkina E., Anikeev M., Bagryansky P. et al. // Phys. Plasmas. – 2017. – Vol. **24**. – P. 022505.

# Содержание диссертации

<b>Введение</b> .....	<b>4</b>
<b>I Динамика неоднородного потока неравновесной плазмы многозарядных ионов</b> .....	<b>16</b>
1.1 Гидродинамическое описание плазмы многозарядных ионов .....	16
1.2 Классификация течений для расширяющегося потока плазмы в условиях многократной ионизации .....	18
1.3 Стационарное течение плазмы многозарядных ионов с переходом через звуковой барьер .....	24
1.4 Потери энергии в потоке плазмы многозарядных ионов .....	27
1.4.1 Объемные потери .....	28
1.4.2 Эффект запираия излучения в плотной плазме .....	29
1.4.3 Конвективные потери .....	34
1.5 Закон сохранения энергии .....	35
1.6 Применимость изотермического приближения .....	40
1.7 Перезарядка ионов на нейтральных атомах .....	41
1.8 Заключение к главе I .....	42
<b>II Плазма многозарядных ионов как источник ЭУФ излучения</b> .....	<b>44</b>
2.1 ЭУФ излучение плазмы олова в открытой магнитной ловушке ...	45
2.1.2 Концепция источника ЭУФ излучения .....	45
2.1.3 Модель .....	45
2.1.4 Сравнение с экспериментальными данными .....	47
2.1.5 Предельные параметры и перспективы использования .....	49
2.2 ЭУФ излучение свободно расширяющейся плазмы ксенона .....	55
2.2.2 Концепция источника ЭУФ излучения .....	55
2.2.3 Модель .....	57
2.2.4 Предельные параметры и перспективы использования .....	58
2.2.5 Сравнение с экспериментальными данными .....	63
2.3 Заключение к главе II .....	69
<b>III Поглощение микроволнового излучения неоднородным плазменным потоком</b> .....	<b>71</b>
3.1 Рассеяние и поглощение высокочастотного поля на однородном плазменном цилиндре .....	71
3.2 Модификация потока плазмы под действием пондеромоторной силы .....	75
3.3 Модель .....	77
3.4 Непрерывные течения .....	78
3.5 Течения с разрывами .....	81
3.6 Бифуркационные значения интенсивности поля .....	83
3.7 Мощность поглощения .....	84
3.8 Заключение к главе III .....	87

<b>IV Поток неравновесной плазмы за пробкой открытой магнитной ловушки</b> .....	<b>89</b>
4.1 Постановка задачи и математическая модель .....	89
4.1.1 Динамика ионов .....	90
4.1.2 Электроны в области столкновительного расширения .....	91
4.1.3 Электроны в области кинетического расширения .....	93
4.1.4 Скачок потенциала у стенки .....	97
4.2 Аналитическое исследование .....	98
4.3 Моделирование .....	100
4.4 Заключение к главе IV .....	103
<b>Заключение</b> .....	<b>106</b>
<b>Основные публикации автора по теме диссертационной работы</b> .....	<b>107</b>
<b>Литература</b> .....	<b>110</b>

АБРАМОВ Илья Сергеевич

**ФОРМИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ ПОТОКОВ  
НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ  
В УСЛОВИЯХ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА**

Автореферат

Подписано к печати 11.10.2021 г.  
Формат  $60 \times 90^{1/16}$ . Усл. печ. л. 1.5.  
Тираж 100 экз. Заказ № 49(2021).

Отпечатано в типографии Института прикладной физики РАН,  
603950 г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46