

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Абрамова Ильи Сергеевича

«Формирование неоднородных потоков неравновесной плазмы многозарядных ионов в условиях микроволнового разряда», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы»

Актуальность темы исследования

Диссертация Абрамова Ильи Сергеевича посвящена теоретическому исследованию неоднородных потоков плазмы, состоящей из электронов и многозарядных ионов и создаваемой при помощи мощного микроволнового излучения. Такая плазма интересна для приложений тем, что способна генерировать линейчатое излучение большой мощности в мягком рентгеновском диапазоне, что крайне ценно для современной активно развивающейся фотолитографии, работающей в области глубокого ультрафиолета. Источник мягкого рентгена с заданной мощностью и высокой эффективностью генерации излучения является весьма востребованным, поэтому разработка математической модели, позволяющей оптимизировать параметры такого источника, крайне актуальна.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертационная работа изложена на 116 страницах, содержит 42 рисунка и одну таблицу. Библиография включает 87 наименований. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во введении автор обосновывает актуальность проведенного исследования, его научную новизну и практическую значимость, формулирует научные положения, выносимые на защиту.

В Главе 1 описан разработанный инструментарий для описания неоднородного плазменного потока неравновесной плазмы с многозарядными ионами. Рассматривается задача о распределении характеристик плазмы с заданным исходным ионным составом, нагреваемой микроволновым излучением, вдоль оси системы с заданным поперечным сечением потока. Модель основана на уравнениях гидродинамики и позволяет получить на выходе мощность линейчатого излучения из плазмы, кратности ионизации и концентрации образовавшихся ионов. В главе решена задача о стационарном течении плазмы с переходом через звуковой барьер и сформулированы граничные условия модели. При рассмотрении учтен эффект запираения линейчатого излучения.

В Главе 2 созданная модель применена для описания реальных разрядов, которые используются как источники ЭУФ излучения. Эксперименты по получению такого излучения, проведенные в ИПФ РАН, были основаны на микроволновых разрядах в двух различных конфигурациях: разряд в потоке олова в открытой магнитной ловушке и разряд в потоке ксенона, свободно

расширяющегося в вакуум. Автором диссертации было проведено моделирование этих разрядов и сравнение их ключевых параметров с полученными экспериментально. На основе этих результатов предложена оптимизация разрядов с опорой на параметры доступных на сегодняшний день вакуумно-дуговых источников плазмы и современных гиротронов.

Глава 3 содержит обсуждение вопросов, связанных со взаимодействием микроволнового излучения с неоднородным плазменным потоком, а именно резонансного усиления электромагнитного поля в плазме. В этом случае высокочастотное электромагнитное поле способно существенно влиять на характеристики разряда. Этот эффект учтен в описываемой модели, рассмотрены особенности течения плазмы в присутствии наведенного внутреннего высокочастотного поля. Показано, что мощность поглощения растет с плотностью энергии быстрее, чем по линейному закону, вследствие того, что область резонансного взаимодействия увеличивается с повышением плотности энергии поля.

Глава 4 посвящена изучению расширяющегося плазменного потока неравновесной плазмы за пробкой открытой магнитной ловушки. В этом случае возникает необходимость перейти от гидродинамического описания электронов, покидающих ловушку, к кинетическому и учитывать изменение их функции распределения. Показано, что ключевым параметром, влияющим на величину конвективных потерь энергии, является протяженность области ускорения ионов в столкновительном режиме в расширяющемся магнитном поле: чем она больше, тем существенней потери. В крупных ловушках типа ГДЛ, где температура электронов достаточно высока, область ускорения мала и негативного влияния на удержание плазмы этот механизм не оказывает, однако он может быть существенным для компактных ловушек, на основе которых проектируются источники ЭУФ излучения.

В заключении автором сформулированы основные выводы работы.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность научных положений и выводов диссертации обеспечена хорошим соответствием результатов моделирования и экспериментальных данных, полученных на двух установках в ИПФ РАН и Газодинамической ловушке в ИЯФ СО РАН.

Описываемые в работе результаты были опубликованы в 27 печатных работах, из них 8 – в реферируемых журналах, а также доложены на 15 международных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором диссертации результатов

Научная значимость работы заключается в расширении знаний о поведении потоков неравновесной плазмы, состоящей из электронов и многозарядных ионов в условиях микроволнового разряда. Автору удалось описать некоторые новые физические эффекты, такие как нелинейное увеличение поглощения электромагнитного поля внутри плазмы на

дипольном резонансе и влияние столкновительного движения частиц в убывающем магнитном поле на конвективные потери из разряда.

Практическая значимость работы обусловлена стремительным развитием многообещающего направления фотолитографии, работающей в области мягкого рентгена. Источники ЭУФ излучения на основе микроволнового разряда могут составить серьезную конкуренцию аналогичным источникам на основе лазерного разряда. Математическая модель источника на основе микроволнового разряда, предложенная автором в диссертационной работе, позволят оптимизировать его параметры, минимизировать потери и предсказать эффективность, а также оценить локальные значения ключевых параметров, таких как концентрации и мощности излучения отдельных ионных фракций, скорость потока, температура электронов и средний заряд ионов, непосредственная диагностика которых в эксперименте является крайне сложной и зачастую нереализуемой задачей. Автор успешно продемонстрировал возможности такой оптимизации для двух различных вариантов реализации источников ЭУФ излучения и нескольких вариантов рабочего вещества.

Также стоит отметить практическую значимость модели, описывающей свободное расширение плазмы за пробкой открытой магнитной ловушки. Модель способна надежно предсказывать ключевой параметр, характеризующий общую эффективность удержания плазмы в ловушке, – величину потерь энергии вдоль магнитного поля. Таким образом становится возможной оптимизация режима удержания, позволяющего получить максимально возможные параметры плазмы для задач УТС.

Новизна полученных результатов

В диссертационной работе *впервые* построена гидродинамическая модель стационарного потока неравновесной плазмы многозарядных ионов в условиях микроволнового разряда и проанализированы возможные варианты течения такой плазмы. Автором предложена и реализована *оригинальная* методика решения используемых уравнений с учетом содержащегося в них перехода через звуковой барьер. Для оценки эффективности потока неравновесной плазмы с многозарядными ионами в качестве источника ЭУФ излучения *впервые* описано линейчатое излучение такой плазмы как оптически плотного объекта с учетом расщепления спектральных линий ионов.

Разработанная модель применена для описания реальных источников ЭУФ излучения на основе микроволнового разряда, разработанных в ИПФ РАН. Таким образом автором диссертации *впервые* установлены оптимальные параметры таких источников и даны рекомендации по их дальнейшему усовершенствованию.

Также в диссертации *впервые* показано, что поглощаемая мощность микроволнового излучения растет с увеличением плотности энергии внешнего поля быстрее, чем по линейному закону, вследствие резонансного

взаимодействия этого излучения с потоком неравновесной плазмы в магнитном поле.

Автором предложена модель расширения плазмы за пробкой открытой магнитной ловушки, которая, в отличие от всех предыдущих работ по данной теме, *впервые* учитывает ускорение ионов в расширяющемся магнитном поле. Благодаря учету этого эффекта результаты моделирования гораздо лучше соответствуют экспериментальным результатам, полученным на установке ГДЛ, чем предыдущие теоретические оценки.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации и полностью отражает результаты работы и выводы, выносимые на защиту.

Личный вклад соискателя в получение результатов исследования

Личное участие автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертации, является определяющим. Все представленные в диссертации результаты, выводы и рекомендации получены непосредственно автором или при его активном участии.

Лично автором проведено аналитическое и численное исследование потоков неравновесной плазмы в микроволновом разряде и верификация полученных результатов на имеющихся экспериментальных данных с последующими предложениями об оптимизации будущих источников ЭУФ излучения на основе микроволнового разряда.

Замечания к диссертационной работе

1. В тексте отсутствует какой бы то ни было обзор предшествующих работ по теме диссертации или описание аналогичных систем, составляющих конкуренцию источникам ЭУФ излучения на основе микроволнового разряда. Эти работы упомянуты в виде ссылок, что не позволяет читателю составить полноценное представление о текущем положении дел в исследуемой области. То же самое касается и темы расширения потока плазмы за пробкой магнитной ловушки, исследования которой ведутся более 30 лет.

2. В работе автор рассматривает две различные конфигурации источников ЭУФ излучения: разряд в открытой магнитной ловушке и разряд, свободно расширяющийся в вакуум. Также перечисляет достоинства и недостатки каждого, но по сути не делает их прямого сравнения, поэтому у читателя остается вопрос – каким же путем лучше двигаться дальше? Какая концепция предпочтительней для промышленного источника ЭУФ излучения на основе микроволнового разряда? Либо есть основания развивать обе концепции параллельно?

3. Основой диссертационной работы является построенная автором гидродинамическая модель неоднородного потока неравновесной плазмы. При этом кажется некоторым упущением отсутствие каких-либо оценок касательно гидродинамических неустойчивостей в такой плазме и их

потенциальной опасности для эффективной работы источников ЭУФ излучения.

4. В тексте работы присутствует небольшое количество опечаток и пунктуационных ошибок.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей высокой оценки проделанной диссертантом работы.

Диссертация Абрамова Ильи Сергеевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, обладающей научной новизной и содержащей научные положения, имеющие существенное значение для дальнейшего развития источников ЭУФ излучения на основе микроволнового разряда.

Работа соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Абрамов Илья Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – «Физика плазмы».

Отзыв составила Солдаткина Елена Ивановна, кандидат физико-математических наук по специальности «физика плазмы» (01.04.08), старший научный сотрудник лаборатории 9-1 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН).

Адрес: 630090 г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11, ИЯФ СО РАН, тел. +7 (383) 329-42-24, e-mail: E.I.Soldatkina@inp.nsk.su

Выражаю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации.

3 ноября 2021 г.



Солдаткина Е.И.

Подпись Солдаткиной Е.И. заверил
учёный секретарь ИЯФ СО РАН

к. ф.- м. н. Резниченко Алексей Викторович
630090 г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11,
тел.: +7 (383) 329-47-99 e-mail: A.V.Reznichenko@inp.nsk.su



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11. Тел. +7 (383) 329-47-60, факс +7 (383) 330-71-63, адрес электронной почты inp@inp.nsk.su