

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»,  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН

\_\_\_\_\_ Васильев Владимир Николаевич

«\_\_» февраля 2025 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

**федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»**

на диссертационную работу Тимшиной Марии Викторовны «Численное моделирование плазмы многозарядных ионов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Тимшиной М.В. посвящена созданию самосогласованных физико-математических моделей, реализующих их компьютерных кодов и проведению с их использованием численных исследований характеристик плазмы многозарядных ионов в сильноточном малоиндуктивном Z - разряде и лазерной плазмы. Рассмотрены ионы He- и Ni – подобных изоэлектронных последовательностей.

#### **Актуальность темы исследования**

Исследования плазмы многозарядных ионов представляют значительный научный и практический интерес. Для ее получения необходимо тем или иным способом создать в веществе высокую плотность мощности. К числу наиболее мощных лабораторных источников энергии, способных решать эту задачу, относятся импульсные лазеры и сильноточные Z-разряды. Возможность получения плазмы многозарядных ионов с помощью источников энергии этого типа рассмотрены в диссертационной работе Тимшиной М.В. В качестве примера практического применения плазмы многозарядных ионов проанализирована возможность формирования активных сред когерентных источников, генерирующих в спектральном диапазоне  $\lambda < 50$  nm. С разработкой когерентных источников излучений в указанном этом спектральном диапазоне связано развитие многих направлений науки, техники и медицины. Такие источники излучений

успешно применяются для изучения свойств вещества в экстремальных условиях (в частности в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу), для модификации поверхности, для визуализации наноразмерных объектов различного, в том числе, биологического происхождения, для инициирования и контроля за развитием физико-химических реакций и т.д. По мере совершенствования характеристик таких источников, направленного на уменьшение длины волны генерации и увеличение параметров излучения (максимальной энергии и мощности в импульсе, средней мощности, частоты повторения импульсов и т.п.), область их применения, безусловно, будет расширяться. В связи с этим исследования по созданию когерентных источников ЭУФ и МР спектральных диапазонов, становятся **актуальными**. Важной частью этих работ являются исследования расчётно - теоретического характера, позволяющие априори получать представляющую большой научный и практический интерес информацию для интерпретации и предсказания результатов экспериментов на существующих и разрабатываемых экспериментальных лазерных установках. Поэтому такие работы приобретают особую **актуальность**. При этом значительный интерес представляют результаты расчетов в рамках комплексного самосогласованного подхода, основанного на численных моделях и компьютерных кодах, способных учитывать основные процессы, создающие неравновесный характер плазмы многозарядной плазмы. К их числу относится диссертационная работа Тимшиной М.В.

### **Научная новизна**

Основной принцип проведения численного моделирования плазмы многозарядных ионов, развиваемый в диссертации М.В. Тимшиной состоит в совместном согласованном рассмотрении основных физических процессов, определяющих ввод энергии в плазму, и физических процессов, определяющих изменение характеристик неравновесной плазмы – плотности, неравновесного ионного состава, температур электронов и ионов, населенностей уровней, коэффициентов усиления и поглощения фотонов и др.

- Важной частью диссертационной работы М.В. Тимшиной является расчетно-теоретическая поддержка экспериментальной установки по созданию лазера ( $\lambda \sim 10 - 15 \text{ nm}$ ) на плазме капиллярного разряда. Установка имела оригинальные элементы: система питания с двойными формирующими линиями, позволяющая реализовывать предварительную ионизацию газа в капилляре скользящим разрядом и многоступенчатую накачку. Эти особенности были учтены и исследованы в диссертации.
- Разработана модель и проведено численное исследование скользящего разряда в диэлектрическом капилляре. Показано хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментально наблюдаемой зависимостью времени скользящего разряда от давления. Найдены способы влияния на радиальную неоднородность плазмы, образующейся после прохождения скользящего разряда.

- Показано, что система питания сильноточного Z-разряда с высоким аспектным отношением, основанная на двойных формирующих линиях, а предварительная ионизация плазмы достигается скользящим разрядом, позволяет осуществлять многоступенчатый ввод энергии в плазму. Такая система питания имеет достоинства в создании плазмы с необходимым составом ионов при меньших параметрах разрядного тока по сравнению с системами на конденсаторных батареях.
- Результаты расчетов ступенчатого ввода энергии в неравновесную плазму малоиндуктивного сильноточного Z-разряда показали возможность получения на переходах Ni-подобных ионов ксенона ( $\lambda=10-20\text{нм}$ ) коэффициентов усиления  $k \sim 1 \text{ см}^{-1}$ .
- Выдвинутая и обоснована результатами проведенного численного моделирования идея профилирования внешнего лазерного импульса для получения плазмы с требуемым ионным составом, позволяющая оптимизировать формирование плазмы многозарядных ионов в качестве активной среды источника излучения.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость диссертационной работы Тимшиной М.В. заключается, главным образом, в том, что в ней создан доступный и эффективный инструмент для комплексного исследования плазмы многозарядных ионов, как источника коротковолнового излучения, создаваемого с помощью малоиндуктивных сильноточных Z- разрядов и лазерной плазмы. Результаты представленных в диссертации исследований позволяют проанализировать перспективы развития работ по созданию ЭУФ и МР — лазеров на свободно — связанных переходах в плазме многозарядных ионов.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение и список литературы. Общий объём диссертации 147 страниц, включая 82 рисунка, 5 таблиц. Библиография включает 154 наименований.

Во введении представлено обоснование актуальности проведенных исследований, раскрыта их новизна и практическая значимость, а также сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе представлен обзор научных публикаций, посвященных исследованиям плазмы многозарядных ионов как источника когерентного коротковолнового излучения. Рассмотрены основные схемы формирования активной среды экстремально ультрафиолетовых (ЭУФ) лазеров и методы получения удельной мощности ввода энергии в плазму для генерации излучения в требуемом спектральном диапазоне. Для сравнения с лазерами на плазме многозарядных ионов, рассматриваемыми в диссертации, кратко отмечены выдающиеся результаты по созданию ЭУФ и МР лазеров на свободных электронах. Отмечены важные прикладные работы по применению ЭУФ – лазеров в различных сферах научной деятельности, в технике, технологиях, биологии, медицины и т.д. На основании проведенного в обзоре анализа подтверждены выводы об актуальности данной работы. Обоснован выбор спектрального диапазона, в котором может быть

осуществлена генерация коротковолнового излучения при существующих на сегодняшний день методах накачки активной среды.

Вторая глава диссертации посвящена моделям расчета физических и оптических свойств однородной изотропной стационарной плазмы многозарядных ионов. Описана столкновительно-излучательная модель, позволяющая рассчитывать ионизационный состав плазмы и населенности уровней ионов, и ее упрощенный вариант для случая, когда время изменения гидродинамических характеристик плазмы (плотности и температур ионов и электронов)  $\tau$  имеет порядок характерного времени ионизации  $t_i$  и много больше характерного времени распределения частиц по возбужденным уровням  $t_{ex}$ . В этом случае система уравнений столкновительно-излучательной модели распадается на две независимые системы – систему для расчета ионизационного состава плазмы и систему для определения населенностей возбужденных уровней. В диссертации М.В. Тимшиной эта упрощенная модель применялась для расчета кинетики ионизации, населенностей возбужденных уровней и излучения неравновесной высокоионизованной плазмы некоторых элементов (Xe, Au, Al). Необходимые для расчетов значения сечений, скоростей и вероятностей элементарных процессов, энергий уровней ионов были взяты из публикаций. Для оптически тонких плазменных ступок - мощности излучения в непрерывном и линейчатом спектрах. Рассчитаны коэффициенты усиления на переходах Ni-подобных ионов золота и проведено сравнение этих результатов с результатами аналогичных расчетов других авторов и имеющимися в публикациях результатами экспериментов. Показано удовлетворительное согласие между ними. Описанные в данной главе модели в дальнейшем применялись для численного моделирования динамики плазмы многозарядных ионов, создаваемой в сильноточном малоиндуктивном Z-разряде с высоким аспектным отношением и лазерной плазме.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования скользящего разряда в диэлектрическом капилляре. Для этого создана модель, представляющая собой «простую жидкостную модель» на основе уравнений Нернста-Планка, позволяющая рассчитывать такие характеристики как концентрации электронов и ионов, электрические поля. Система уравнений также может быть дополнена и уравнениями для удельных энергий электронов и ионов. Уравнения решаются в двумерном осесимметричном приближении. С помощью моделирования исследована зависимость степени неоднородности характеристик плазмы от входных параметров модели. Скользящий разряд в этой работе рассматривался как способ предыонизации плазмы сильноточного Z-разряда.

Четвертая глава посвящена численному моделированию динамики плазмы многозарядных ионов, создаваемой в сильноточном Z-разряде с высоким аспектным отношением. Уменьшение индуктивности разряда достигается за счет расположения цилиндрического обратного токопровода непосредственно на внешней стенке разрядной камеры. Для описания динамики плазмы использована одномерная (1D) двухтемпературная (2T) радиационно-магнитогидродинамическая модель. Эта модель согласованно учитывает формирование импульса разрядного тока в электрической цепи, диффузию магнитного поля в плазму и ее джоулев нагрев, обмен энергией между ионами и электронами за счет упругих столкновений, нестационарную ионизацию плазмы и охлаждение плазмы за счет излучения в сплошном и линейчатом спектрах. Необходимый для этого расчет физических и оптических свойств плазмы проводился с помощью описанных во второй главе моделей.

Проведен численный анализ возможности развития сильноточного разряда при создании начальной ионизации плазмы с помощью скользящего по внутренней стенке капилляра разряда, рассмотренного в третьей главе. В результате моделирования динамики плазмы получены пространственно-временные распределения плотности и температур. Для этих распределений проведены расчеты коэффициента усиления на переходах He- и Ni-подобных ионов. Возможный на некоторых рассматриваемых переходах эффект самопоглощения резонансного излучения учитывался в рамках модели Бибермана-Холстейна с помощью коэффициента ускользания. В результате проведенных расчетов определены условия, для которых коэффициент усиления на рассматриваемых переходах  $g^+ > 1 \text{ см}^{-1}$ . Препятствием для продвижения в область коротких волн генерации является необходимость достижения необходимой удельной мощности ввода энергии в плазму, которую в случае накачки сильноточным разрядом ограничивает индуктивность системы накачки.

В пятой главе диссертации приведены результаты численного моделирования лазерной плазмы при облучении цилиндрических плазменных сгустков наносекундными и пикосекундными лазерными импульсами умеренно высокой интенсивности  $< 10^{15} \text{ Вт/см}^2$  с полной энергией в импульсе  $\sim 10 \text{ Дж/см}$ . Это внешнее лазерное излучение считалось однородно распределенным по поверхности мишени, его поглощение в плазме мишени учитывалось в рамках модели обратного тормозного поглощения. Динамика плазмы мишеней описывалась в одножидкостном двухтемпературном одномерном радиационно – гидродинамическом (РГД) приближении совместно с нестационарной ионизацией плазмы. Необходимый для этого расчет физических и оптических свойств плазмы проводился с помощью описанных во второй главе моделей. Определение населённостей ионных уровней, инверсии и коэффициента усиления на рассматриваемых переходах проводилось в предположении, что характерное время ионизации много больше времени формирования и релаксации возбуждённых уровней. В рамках данной модели проведены оценки коэффициента усиления на переходах ионов H- и He- подобной изоэлектронных последовательностей. Для верификации расчетов использовались результаты экспериментов, проводившиеся на лазерной установке Вулкан в Резерфорд-Эпплтоновской лаборатории по наблюдению усиления на переходе  $3 - 2$  иона C VI ( $\lambda=18.2 \text{ нм}$ ) в расширяющейся плазме углеродной нити, и соответствующие им расчеты ВНИИЭФ (Арзамас 16).

В заключении представлены выводы, обобщающие результаты работы.

### **Вопросы и замечания по диссертации**

Представленная работа содержит результаты комплексного исследования динамики, неравновесного ионного состава и поуровневой кинетики плазмы многозарядных ионов при вводе в плазму энергии с помощью сильноточного малоиндуктивного Z-разряда капиллярного типа и всестороннего облучения мощным лазером. Сильной стороной работы является согласованность анализа процессов, определяющих ввод энергии в плазму и изменение ее физического состояния. Несмотря на все очевидные достоинства диссертационной работы Тимшиной Марии Викторовны, по работе есть замечания.

•

- Так как работа посвящена компьютерному моделированию, было бы целесообразно больше внимания уделить описанию использованных методов численного решения задач.
- Требования к однородности распределения характеристик плазмы многозарядных ионов как активной среды коротковолнового лазера достаточно высоки. В связи с этим было бы желательно проблему однородности и развития неустойчивостей различных типов применительно к рассматриваемым условиям проанализировать более детально. Особенно это относится к плазме, создаваемой в сильноточном Z-разряде.
- В последних наиболее значимых экспериментах с лазерной плазмой как с активной средой коротковолновых лазеров рассматривается облучение мишени в виде фольги. Кажется, что было бы более целесообразно рассматривать в расчетной модели такую геометрию.
- Также при прочтении текста диссертации встречаются опечатки в нумерациях формул и литературы.

Следует отметить, что высказанные замечания имеют рекомендательный характер и не снижают общего положительного впечатления от работы. В целом необходимо отметить, что диссертационная работа Тимшиной М.В. является законченным научным исследованием, направленным на решение современных и актуальных задач в области исследований плазмы многозарядных ионов.

Тимшина Мария Викторовна является соавтором 12 публикаций по тематике диссертации, входящих в международные базы данных Web of Science и Scopus или ядро РИНЦ. Результаты работы М.В. Тимшиной докладывались на российских и международных конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы и обсуждены.

### **Степень достоверности полученных результатов**

Достоверность результатов, представленных в диссертации Тимшиной М.В. подтверждается следующими обстоятельствами. Разработанные и применявшиеся для расчетов компьютерные коды основаны на хорошо апробированных численных методах решения систем дифференциальных уравнений. Отсутствуют противоречия полученных результатов с данными предыдущих исследований. Полученные в диссертации результаты соответствуют результатам других авторов и публикациям в научных изданиях. Кроме того, их достоверность подтверждается прохождением критического рецензирования перед публикацией в отмеченных выше научных изданиях.

### **Заключение**

По актуальности решаемых задач, объему выполненных исследований, уровню их обсуждения и научной значимости диссертация М.В. Тимшиной является законченным научным исследованием. Научные положения и результаты диссертации четко обоснованы. Автореферат дает полное представление о содержании диссертации.

Таким образом, актуальность исследований, новизна, достоверность и практическая значимость выводов, сделанных в диссертационной работе Тимшиной Марии Викторовны «Численное моделирование плазмы многозарядных ионов» не вызывают сомнений.

Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание закономерностей формирования основных характеристик плазмы многозарядных ионов и их эволюции в лазерной плазме и плазме сильноточного  $Z$  – разряда капиллярного типа. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям «Положением о присуждении учёных степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук», а автор диссертационной работы, Тимшина Мария Викторовна, заслуживает присуждение ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация и отзыв обсуждены и одобрены на научном семинаре международного научно-образовательного центра физики наноструктур федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» (протокол № 01 от 26.02.2025).

Отзыв составил:

Профессор международного научно-образовательного центра физики наноструктур, руководитель, доктор физико-математических наук, профессор

Рождественский Юрий Владимирович

27.02.2025

Сведения о ведущей организации:

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Почтовый адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, лит. А.

Телефон: +7 (812) 607-02-79

E-mail: [od@itmo.ru](mailto:od@itmo.ru)

Официальный сайт организации: <https://itmo.ru>