

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ
РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ТИМШИНА МАРИЯ ВИКТОРОВНА

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАЗМЫ
МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ**

Специальность 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
д. ф.-м. н.
Калинин Николай Валентинович

Санкт-Петербург — 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель: Калинин Николай Валентинович, д. ф.-м.н.,
в.н.с., ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: Андреев Александр Алексеевич, д.ф.-м.н.,
профессор, Санкт-Петербургский
государственный университет

Артюков Игорь Анатольевич, к. ф.-м.н, в.н.с.
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
университет ИТМО»

Защита состоится 12 марта 2025г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 34.01.04 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу:

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе и на веб-сайте ФТИ www.ioffe.ru.

Автореферат разослан 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к. ф.-м. н

П. С. Штернин

Актуальность темы диссертации

Плазма многозарядных ионов широко применяется в научных исследованиях и технике. Например, для создания источников излучений, в том числе когерентных, генерирующих в экстремально ультрафиолетовом спектральном диапазоне. Для этого необходимо тем или иным способом получить в веществе высокую плотность мощности. Например, с помощью ядерного взрыва, взаимодействия мощного импульсного лазера с веществом, сильноточного Z-разряда и т.п. Наиболее мощными лабораторными источниками энергии являются импульсные лазеры и, уступающие им первенство, но имеющие преимущества по эффективности использования энергии первичного накопителя, сильноточные (пинчующиеся) Z-разряды. В первом случае энергия первичного источника передается непосредственно электронам, во втором – ионам в процессе сжатия плазмы, нагрев электронов осуществляется вследствие взаимодействия электронов с ионами. Эти способы получения плазмы многозарядных ионов рассмотрены в данной работе. В качестве примера практического применения плазмы многозарядных ионов рассмотрена возможность формирования активных сред когерентных источников, генерирующих в спектральном диапазоне $\lambda < 50$ нм.

С разработкой когерентных источников излучений (лазеров) в экстремально ультрафиолетовом (ЭУФ) и мягком рентгеновском (МР) спектральных диапазонах связано развитие многих направлений науки, техники и медицины. Такие источники излучений успешно применяются для излучения 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. Более детально прикладные работы, в которых применяются когерентные источники излучения ЭУФ и МР

спектральных диапазонов проанализированы в первой, обзорной, главе диссертации. 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, стали 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 особый 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 данная работа.

Цель работы

Основные цели данной работы: создание физико-математических моделей и компьютерных кодов для проведения самосогласованных комплексных численных исследований характеристик многократно ионизованной плазмы сильнооточного малоиндуктивного Z - разряда и лазерной плазмы. Результаты этих исследований позволяют проанализировать перспективы развития работ по созданию ЭУФ и МР -лазеров на свободно-связанных переходах в плазме многозарядных ионов. Рассмотрены ионы He- и Ni-подобных изоэлектронных последовательностей. Для достижения поставленных целей были решены задачи.

- Разработана кинетическая численная модель и созданы компьютерные коды для расчета неравновесного ионного состава плазмы.

- Разработана кинетическая численная модель и созданы компьютерные коды для расчета эволюции населенностей возбужденных уровней, инверсии населенностей и коэффициентов усиления для переходов некоторых элементов He- и Ni- подобных изоэлектронных последовательностей.

- Разработаны компьютерные коды для оценок и приближенных расчетов реабсорбции резонансного излучения, в основу которых положено приближение Бибермана – Холстейна.

- Разработаны и созданы компьютерные коды для численного моделирования динамики плазмы многозарядных ионов в одножидкостном двухтемпературном одномерном радиационно-магнито-гидродинамическом приближениях.

- На базе разработанных компьютерных кодов созданы комплексы компьютерных программ для проведения самосогласованного численного моделирования характеристик активных сред на плазме многозарядных ионов с неравновесным ионным составом. Проанализированы возможности создания такой плазмы с помощью сильноточного малоиндуктивного Z – разряда с высоким аспектным отношением и импульсного лазера наносекундного диапазона с умеренно высокой мощностью излучения $<10^{15}$ Вт/см².

- Особенность рассмотренного сильноточного Z-разряда с высоким аспектным отношением заключается в том, что он имеет малую индуктивность благодаря расположению обратного цилиндрического токопровода непосредственно на внешней стенке капилляра. Проведено численное моделирование и исследование скользящего по внутренней стенке капилляра разряда, позволяющего создавать предварительную ионизацию газа в разрядной камере.

- Проведены расчеты формирования активных сред на переходах He- и Ni- ионов и найдены рабочие условия, при

которых коэффициент усиления может превышать важное в практическом отношении значение, равное 1 см^{-1} .

Проведенные в диссертации численные исследования позволили очертить перспективы создания ЭУФ и МР лазеров на переходах многозарядных ионов с активными средами, формируемыми на лазерной плазме и плазме протяженного Z-разряда.

Научная новизна

В настоящей работе фокус направлен на комплексный анализ источника на плазме многозарядных ионов, моделирование и оценки его как целого. Ведется подробный расчет динамики плазмы с неравновесным зарядовым составом, учитываются процессы в цепи питания, делаются расчеты и для коэффициента усиления источника рентгеновского излучения, делается расчет для этапа предыонизации плазмы и т.д. Основная цель такого анализа – возможность давать рекомендации для реальных экспериментов в этой области.

Настоящее численное исследование в основе своей является расчетно-теоретической поддержкой экспериментальной установки по созданию лазера на плазме капиллярного разряда [1]. Установка имела оригинальные элементы: система питания с двойными формирующими линиями, позволяющая реализовывать многоступенчатую накачку (глава 4), и предыонизацию скользящим разрядом (глава 3). Эти особенности были учтены и исследованы в моделировании.

Концепция профилирования формы лазерного импульса разрабатывалась в работах по УТС. В данной работе идея профилирования перенесена на класс задач о многозарядной плазме (глава 5). Расчеты показывают, что, действительно, форма лазерного импульса может влиять на заряд плазмы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты расчетов ионного состава и населенностей уровней Ni-подобного иона золота в оптически тонкой плазме в однородном стационарном приближении, показавшие возможность получения коэффициента усиления $k^+ \geq 1 \text{ см}^{-1}$.

2. Модель и результаты расчета скользящего разряда в диэлектрической трубке. Хорошее совпадение результатов расчетов с экспериментально наблюдаемой зависимостью времени скользящего разряда от давления. Установлены способы управления радиальной степенью неоднородности плазмы, образующейся после прохождения скользящего разряда.

3. Установлено, что система питания сильноточного Z-разряда с высоким аспектным отношением, основанная на двойных формирующих линиях, в которой предварительная ионизация плазмы осуществляется скользящим разрядом, и реализуется многоступенчатый ввод энергии в плазму имеет достоинства в создании плазмы с необходимым составом ионов при меньших параметрах разрядного тока по сравнению с системами на конденсаторных батареях.

4. Результаты расчетов для ступенчатого ввода энергии в неравновесную плазму малоиндуктивного сильноточного Z-разряда He-подобных ионов азота и Ni-подобных ионов ксенона и расчеты коэффициента усиления $k^+ \sim 1 \text{ см}^{-1}$ для длин волн $\lambda=10\text{-}20\text{нм}$.

5. Выдвинутая на основе проведенного численного моделирования идея профилирования внешнего лазерного импульса для получения плазмы с требуемым ионным составом, позволившая оптимизировать формирование активной среды источника излучения. Результаты расчетов характеристик плазмы натрия и азота, созданной под воздействием лазерного излучения с длинами волн 1 и 10мкм. Предложенные способы максимизации среднего заряда плазмы.

Практическая значимость

Значительная научная и практическая значимость диссертационной работы М.В. Тимшиной заключается, главным образом, в том, что в ней создан эффективный и доступный инструмент для комплексного исследования лазерных и разрядных систем для получения и исследования плазмы многозарядных ионов как источников коротковолнового излучения.

Достоверность полученных результатов

Использованные коды опираются на апробированные численные методы решения систем дифференциальных уравнений и непротиворечивость полученных результатов с данными предыдущих исследований, что позволяет говорить о достоверности получаемых результатов.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в участии в формулировании поставленных задач, их компьютерной реализации, апробации и анализе полученных результатов.

Апробация работы

Результаты настоящего исследования были представлены на 9ти международных и российских научных конференциях: 46th European Physical Society Conference on Plasma Physics EPS 2019 (Милан, Италия), 47th European Physical Society Conference on Plasma Physics EPS 2021 (Ситжес, Испания), International Symposium on Electrohydrodynamics ISEHD 2019 (Санкт-Петербург, Россия), «Физика - наукам о жизни 2019» (Санкт-Петербург, Россия), Физика.СПб 2019/2020(Санкт-Петербург, Россия), International Conference Laser Optics ICLO 2020/2022 (Санкт-Петербург, Россия), 37ая Фортковская конференция по уравнению состояния вещества ELBRUS 2022 (пос. Эльбрус, Россия), Международная

(Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС 2021 (Звенигород, Россия).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 12 публикациях, входящих в базы данных Web of Science или ядро РНИЦ. В публикациях, где соискатель является первым автором, вклад в работу диссертанта определяющий. Для публикаций, где соискатель не является первым автором, в скобках указан личный вклад диссертанта):

1. Influence of voltage pulse rise-time on initiation and propagation of fast ionization waves in extended capillarie / Eliseev S., Timshina M., Samokhvalov A., et al. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1400. – id.077017. (*Тестирование используемой модели*)
2. Kalinin N., Timshina M., Burtsev V. Two-stage compression of plasma of multicharged ions created in a low-inductive high-current capillary Z-discharge as a method for pumping the medium of short-wave lasers // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – V. 1697. – no.1. – id.012080. (*Обработка результатов, пространственно-временные графики*)
3. Timshina M., Eliseev S., Kalinin N., et al. Numerical investigation of dynamics and gas pressure effects in a nanosecond capillary sliding discharge // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 125. – id.143302.
4. Fast Ionization Waves in Extended Capillaries Initiated by High-Voltage Pulses With Varying Rise Rates: A Numerical Investigation / Timshina M., Eliseev S., Samokhvalov A., et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2020. – V. 48. – no. 2. – P.369–374.
5. Наносекундный генератор высоковольтных импульсов на основе искусственных двойных формирующих линий / Бурцев В.А., Бурцев А.А., Бельский Д.Б., ..., Тимшина М.В. // ПТЭ. – 2020. – no. 4. – Сс. 23–28. (*Проведение МРГД - расчета для экспериментальных условий*)
6. Numerical investigation of capillary discharge initiation by fast ionization waves / Timshina M., Eliseev S., Kalinin N., et al. // Journal of Electrostatics. – 2020. – Vol.107. – id. 103485.

7. Plasma dynamics at the preionization stage in discharge-based EUV lasers / Eliseev S., Timshina M., Samokhvalov A., et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2021. – Vol.54. – Id. 095201. *(Варьирование начальных условий, оформление результатов)*
8. Rybin Y., Kalinin N., Timshina M. The using of soft X-ray radiation created by nanosecond sliding discharge plasma for preionization of active media in gas lasers // Transactions on a plasma science. – 2021. – Vol. 49. – no.4. – P.1262—1267. *(Оформление и подача статьи)*
9. Калинин Н.В., Тимшина М.В. Динамика и неравновесный состав плазмы многозарядных ионов, создаваемой при взаимодействии мощного лазерного излучения с цилиндрической плазменной мишенью // Письма в ЖТФ. – 2022. – Vol.48. – no.6. – Сс. 11-15. *(Апробация модели и получение представленных в статье графиков)*
10. Тимшина М.В., Калинин Н.В. Расчет ключевых параметров плазмы многозарядных ионов при воздействии внешнего лазерного импульса // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2022. – no.4. – Сс. 44-54.
11. Fast capillary discharge device for soft x-ray generation in the “carbon-window” and “water-window” spectral regions / Samokhvalov A.A., Sergushichev K.A., Eliseev S.I., ..., Timshina M.V., et al. // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol.17. – no. 06. – Id. P06002. *(Обсуждение результатов, оформление работы)*
12. Numerical characterization of a discharge-based compact soft x-ray source operation in CO₂ and Ar:He mixture / Samokhvalov A. A., Sergushichev K. A., Eliseev S. I., ..., Timshina M. V., et al. // Phys. Plasmas. – 2023. – Vol. 30, no. 5. – Id.053101. *(Разработка модели для смеси газов)*

Структура диссертации и содержание 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.

Первая глава диссертации – это аналитический обзор результатов работ, направленных на создание лазеров ЭУФ спектрального диапазона [2-6]. Основной акцент сделан на анализе

физических процессов формирования активных лазерных сред на переходах многозарядных ионов. Рассмотрены вопросы, касающиеся энергетических характеристик лазерных установок, методов получения необходимой удельной мощности для накачки активной среды. Проведен краткий анализ достижений рентгеновской оптики, определяющих возможности использования многослойных зеркал для создания резонаторов, работающих в рассматриваемом спектральном диапазоне. Работы по преобразованию частоты для получения когерентного рентгеновского излучения, образующие самостоятельное направление, в данном обзоре не рассматриваются. Кратко отмечены выдающиеся результаты по созданию ЭУФ и МР лазеров на свободных электронах для сравнения с лазерами на плазме многозарядных ионов. 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 сделаны выводы об актуальности данной работы, о выборе спектрального диапазона, в котором может быть осуществлена генерация при существующих на сегодняшний день методах накачки активной среды. Сформулированы основные требования к физическим и оптическим характеристикам плазмы многозарядных ионов, как активной среды, и намечены методы моделирования ее основных характеристик - температур электронов и ионов, плотности тяжелых частиц, ионного состава, населенностей ионных уровней, коэффициентов усиления и поглощения.

Вторая глава диссертации посвящена расчетам физических и оптических свойств однородной изотропной стационарной плазмы многозарядных ионов. Определены границы области параметров физического состояния высокоионизованной плазмы, в которой ее ионный состав является неравновесным. Описана столкновительно-излучательная модель [7-9], позволяющая рассчитывать ионизационный состав плазмы (рисунок 1) и населенности уровней ионов. В проведенных оригинальных

расчетах дальнейшем рассматривается случай, когда время изменения гидродинамических характеристик плазмы (плотности и температур ионов и электронов) τ_p порядка характерного времени ионизации τ_i и много больше характерного времени распределения частиц по возбужденным уровням τ_{ex} . В этом случае населенности уровней успевают релаксировать к своим стационарным значениям. А система уравнений столкновительно-излучательной модели распадается на две независимые системы – систему для расчета ионизационного состава плазмы и систему для определения населенностей возбужденных уровней. Эти модели в данной работе применялись для расчета кинетики ионизации, населенностей возбужденных уровней и излучения неравновесной высокоионизованной плазмы некоторых элементов (Xe, Au, Al). При этом учитывалось снижение потенциала ионизации. Необходимые для этого значения сечений, скоростей и вероятностей элементарных процессов, энергий уровней ионов взяты из публикаций. Для плазмы этих элементов в широких диапазонах плотности и температуры проведены расчеты зарядового состава, характерного времени степени и ионизации, заряда среднего иона. Для оптически тонких плазменных сгустков - мощности излучения в непрерывном и линейчатом спектрах. Рассчитаны коэффициенты усиления на переходах Ni-подобных ионов золота (рисунок 2). Проведено сравнение этих результатов с результатами аналогичных расчетов других авторов и имеющимися в публикациях результатами экспериментов. Они удовлетворительно согласуются с результатами данной работы. 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.

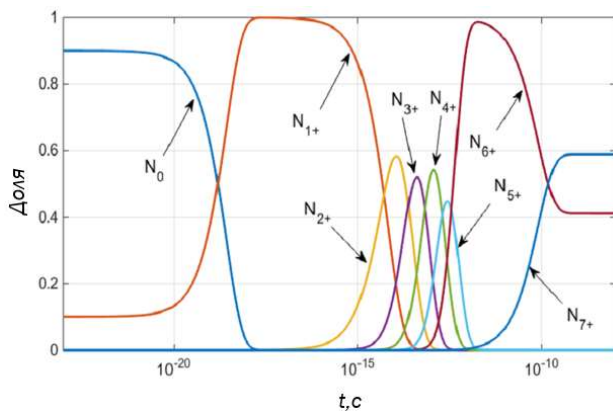


Рис. 1. Эволюция доли разных ионов плазмы азота при температуре электронов 150эВ и плотности плазмы 1,1кг/м³.

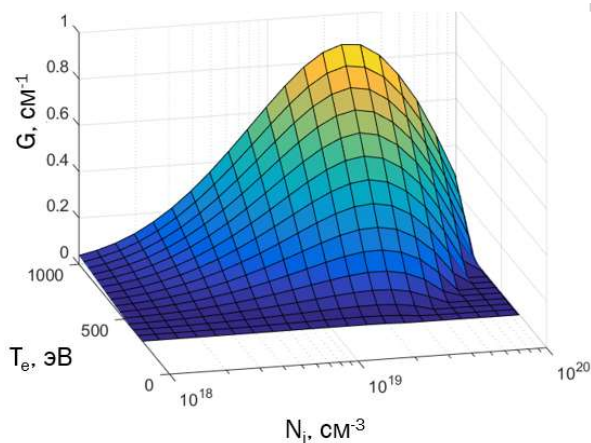


Рисунок 2: Поверхность, иллюстрирующая зависимость коэффициента усиления в центре линии в среде Au⁺⁵¹ на переходе 4d→4p (3.5нм) от температуры электронов и плотности тяжелых частиц с учетом коэффициента ускользания при размерах плазмы 0.001см (10мкм) при лоренцевское уширении.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования скользящего разряда [10,11] в диэлектрической

трубке. Для его исследования создана модель, на основе результатов которой анализируются свойства скользящего разряда. Модель представляет собой «простую жидкостную модель» на основе уравнений Нернста-Планка, где рассчитываются 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 проиллюстрирована зависимость с локальным минимумом времени протекания скользящего разряда в зависимости от давления, модель также позволила исследовать, как зависит степень неоднородности характеристик плазмы в зависимости от входных параметров модели (рисунок 3). Скользящий разряд в этой работе рассматривался как способ предыонизации плазмы сильноточного Z-разряда [12].

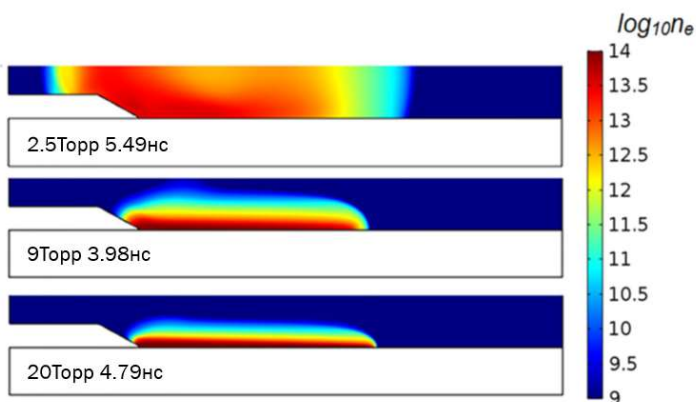


Рисунок 3: Объемное распределение десятичного логарифма от концентрации электронов при разных давления при прохождении скользящего разряда.

Четвертая глава посвящена численному моделированию динамики плазмы многозарядных ионов, создаваемой в сильноточном Z-разряде [13] 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 ее охлаждение 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 распределения плотности и температур (рисунки 4,5). 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 $>1 \text{ см}^{-1}$. 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 активных сред ЭУФ - лазеров на переходах многозарядных ионов в лазерной плазме. Рассмотрены варианты создания лазерной плазмы при облучении цилиндрических плазменных сгустков (мишеней) наносекундными

и пикосекундными лазерными импульсами умеренно высокой интенсивности $<10^{15}$ Вт/см² с полной энергией в импульсе ~ 10 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, позволяющая рассчитывать пространственно-временные распределения плазмы (рисунок 6), описывалась в одножидкостном двухтемпературном одномерном радиационно – гидродинамическом (РГД) приближении совместно с нестационарной ионизацией плазмы. 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. Полученная в результате РГД- моделирования активной среды информация о распределениях плотности, электронной температуры и ионного состава использовалась для определения населённостей рабочих уровней, инверсии и коэффициента усиления активной среды на рассматриваемом переходе в центре заданного контура линии. 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-Эплтоновской лаборатории [14, 15].

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Созданы компьютерные коды и проведено комплексное численное моделирование неравновесной плазмы многозарядных ионов, создаваемой в сильноточном Z-разряде капиллярного типа и лазерной плазме. Для более полного исследования такой плазмы были разработаны коды для расчета поуровневой кинетики и коэффициентов усиления слабого сигнала на переходах ионов He – подобной и Ni – подобной изоэлектронной последовательностей.

2. Динамика плазмы в Z- разряде рассматривалась согласованно с формированием импульса разрядного тока в электрической цепи, взаимодействием импульсного электромагнитного поля с плазмой разряда и созданием в плазме необходимого зарядового состава. Результаты численного моделирования показали, что на переходах с длинами волн 10-20нм может быть получен коэффициент усиления $g \sim 1 \text{ см}^{-1}$.

3. Рассмотрены случаи, когда активная среда ЭУФ — лазера формируется при взаимодействии импульсов излучения CO₂-лазера или лазера на неодимовом стекле, создающих потоки умеренно высокой интенсивности $\sim 10^{14} — 10^{15} \text{ Вт/см}^2$ при длительности импульсов в диапазоне пико- и наносекунд. Лазерное излучение, падающее на цилиндрическую мишень, считается равномерно распределенным по ее поверхности. Поглощение в плазме мишени внешнего лазерного излучения учитывается по обратному тормозному механизму. В ключе такой модели была проиллюстрирована идея профилирования импульса и управления зарядовым составом плазмы.

4. Для установок, где плазма создается за счет Z-разряда встречается случай, когда предыонизация плазмы происходит за счет скользящего разряда. Было проведено моделирование такого разряда и проведен анализ, на сколько низко проводящая плазменная оболочка, образующаяся после прохождения такого разряда вдоль капиллярной трубки, препятствует сжатию плазмы на основном сильноточном этапе, а также были найдены пути влияния на степень радиальной неоднородности плазмы послед прохождения скользящего разряда.

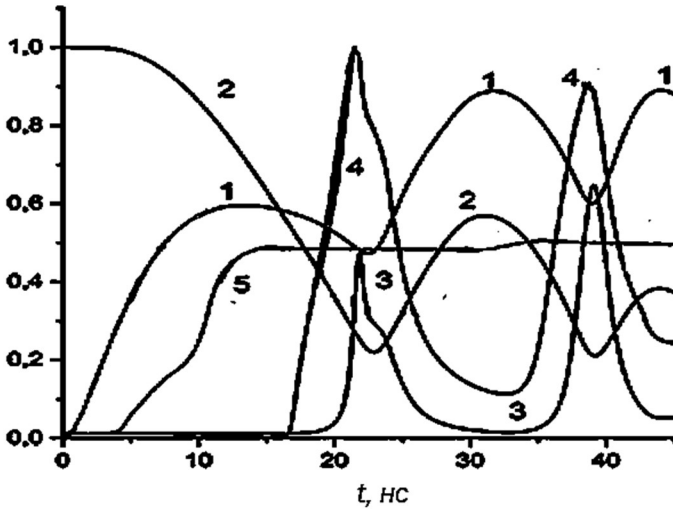


Рисунок 4: Характеристики плазмы на оси: 1 – ток в цепи $I/250\text{кА}$, 2- нормированный радиус плазменного столба r/r_0 , 3 – сжатие плазмы $\rho/\rho_0/100$ на оси, 4 - температура электронов $T_e/690\text{эВ}$ на оси, 5 – средний заряд $Z/54$ на оси.

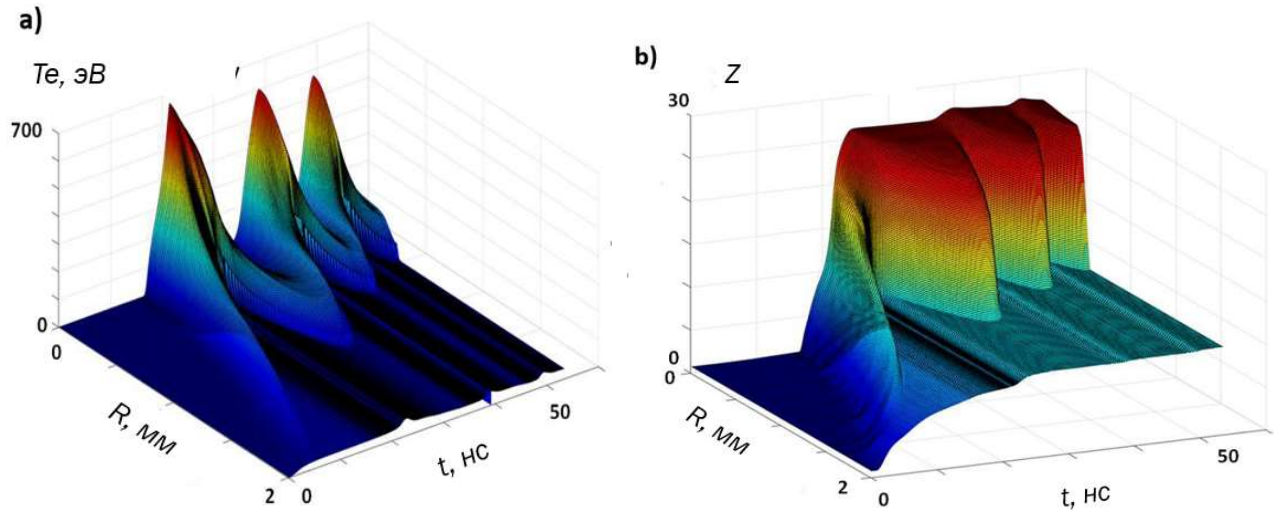


Рисунок 5: Пространственно-временные графики температуры (а) и среднего заряда(б) в протяженном Z-разряде для ксенона; в качестве параметров цепи взято сопротивление формирующей линии, равное 1 Ом, напряжение на генераторе нарастает за 2нс до 200кВ и держится постоянным в течении 100нс, длина капилляра 10см, диаметр 4 мм, начальное давление ксенона в капилляре 4Торра.

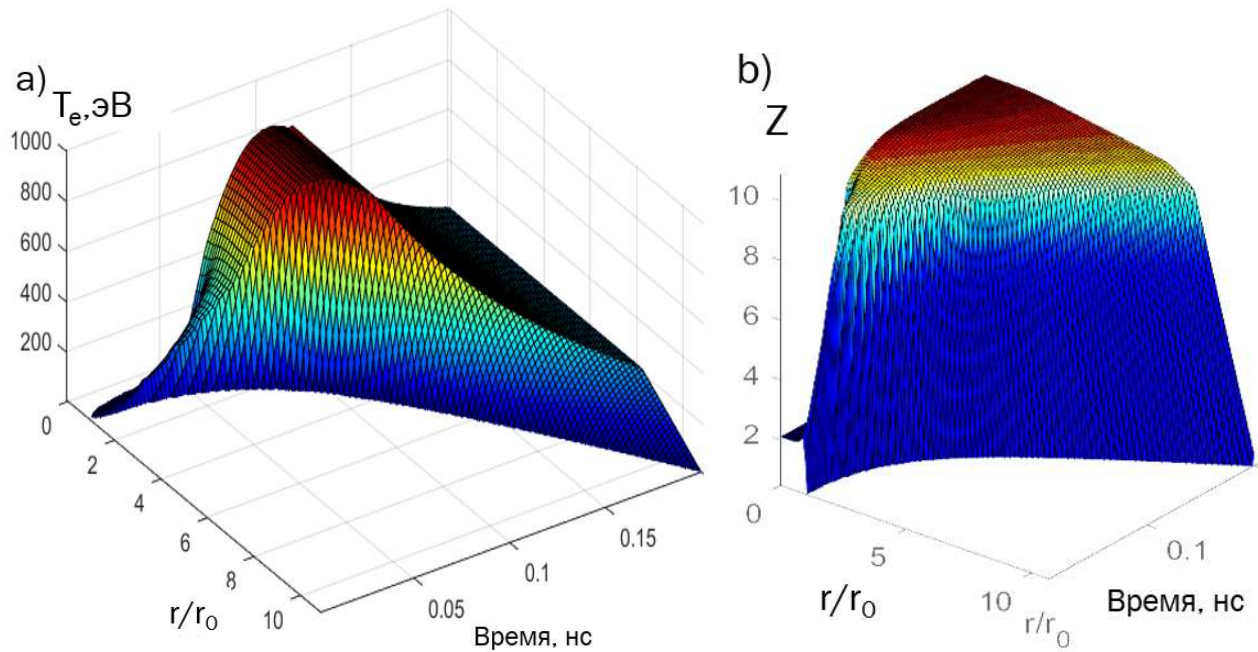


Рисунок 6: Пространственно-временные графики температуры (а) и среднего заряда(б) в лазерной плазме натрия при воздействии бокового облучения с длиной волны 10мкм и максимальной мощностью $5 \times 10^{13} \text{ Вт/см}^2$; при этом $r_0 = 1 \times 10^{-3} \text{ см}$, плотность $3 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$.

Литература

- [1] Бурцев В.А., Забродский В.В., Калинин Н.В., Большаков Е.П. Источники электромагнитного излучения на основе малоиндуктивного протяженного z-разряда // Журнал технической физики - 2013. - Т.58, №2. - с.192-199.
- [2] Боровский, А. В. Плазма многозарядных ионов: элементарные процессы, кинетика и рентгеновские лазеры / Боровский А. В., Запрягаев С. А., Зацаринный О. И., Манаков Н. Л. Санкт-Петербург: Химия: Санкт-Петербургское отделение. - 1995.
- [3] David Attwood, *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation: Principles and Applications* / Cambridge University Press, Cambridge, UK. - 1999.
- [4] Р. Элтон, Рентгеновские лазеры / Перевод с англ. В. Е. Левашова, О. И. Толстихина; Под ред. [и с предисл.] А. В. Виноградова. - М. : Мир. – 1994.
- [5] Suckewer S., and Jaegle P. X-Ray laser: past, present, and future. // *Laser Phys. Lett.* - 2009.- Vol. 6, No. 6. - P. 411.
- [6] Боровский А.В., Галкин А.Л. Лазерная физика: рентгеновские лазеры, ультракороткие импульсы мощные лазерные системы / М.: ИзДАТ - 1996. – 496 с.
- [7] Вергунова Г.А., Иванов Е.М., Розанов В.Б. Столкновительно – радиационная модель расчета ионизационного состава и населенностей неравновесной плазмы (Al, Ar, Au) // Препринт ФИАН. – 1998. - № 12.
- [8] Афанасьев Ю.В., Шляпцев В.Н. Формирование инверсии на переходах Ne-подобных ионов в стационарной и нестационарной плазме // *Квантовая электроника.* 1989. Т. 16. № 12. С. 2499 – 2509.
- [9] Ralchenko. Y. *Modern Methods in Collisional – Radiative Modelling of Plasma* / Cham: Springer International Publishing, 2016. Vol. 90 of Springer Series on Atomic, Optical and Plasma Physics..
- [10] Dashuk P. N., Kulakov S. L., Rybin V. Y. Gas ionization by soft X-ray radiation of a nanosecond sliding discharge // *Lett. JTP.* -1985 - Vol. 11, No. 7. - P. 438–442.
- [11] Трусов К.К., Импульсный субмикросекундный многоканальный скользящий разряд противоположных полярностей: заполнение разрядного промежутка искровыми каналами // *Физика плазмы* - 2012. - Т. 38, № 5. - с. 419–429.
- [12] Atanasov P. A., S. G. Vasilev, I. O. Kovalyov, G. P. Kuz'min, and A. A. Nesterenko, “An investigation of the efficiency of a sliding discharge as a source of pre-ionisation and a plasma cathode in high pressure CO₂ lasers // *J. Phys. D Appl. Phys.* – 1988. - Vol. 21, no. 12 - pp. 1750–1754. Dec. 1988.
- [13] Rocca J.J. Table-top soft x-ray lasers (Review article) // *Rev. Sci. Instr.* - 1999. - Vol. 70, No.10. - P. 3799 – 3827.
- [14] Гулов А.В., Держиев В.И., Жидков А.Г., Притула А.Г., Чекмезов А.Н., Яковленко С.И. Расчет коэффициентов усиления в лазерной плазме CVI при разлете цилиндра и цилиндрического слоя // *Квантовая электроника.* - 1990. - Т. 17, № 8. - С. 1050 – 1053.
- [15] Кайнов В.Ю., Линник В.М., Масленников Д.Б., Урлин В.Д. Расчетное моделирование рекомбинационного рентгеновского лазера // *Квантовая электроника.* - 1993.- Т. 20. № 2. - С. 137 – 141.