

## ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Плазма многозарядных ионов, как известно, является эффективным источником мягкого рентгеновского (длины волн 1-10 нм) и экстремального ультрафиолетового (длины волн 10-50 нм) излучения. При этом, практически единственной альтернативой лабораторным плазменным источникам в этом спектральном диапазоне являются источники синхротронного излучения, которые представляют из себя существенно более дорогие и крупные исследовательские установки национального масштаба класса «мегасайенс». Инверсия в многозарядной плазме позволяет осуществить когерентное усиление рентгеновского излучения и создать рентгеновские лазеры для целого ряда новых приложений и задач. С другой стороны, подробный расчёт динамики ионного состава и электронных состояний горячей плазмы является сложной многопараметрической задачей, требующей учета большого числа газодинамических, радиационных и других процессов в плазме.

Диссертационная работа Тимшиной М.В. является новым шагом в решении данной задачи. **Актуальность** этого теоретического исследования обусловлена востребованностью разработки ярких когерентных и некогерентных лабораторных источников мягкого рентгеновского излучения. **Практическая важность и новизна** данной работы подтверждается, прежде всего, разработкой и анализом численных моделей, связанных с созданием и оптимизацией уникального рентгеновского источника на основе капиллярного разряда. При этом разработанные в диссертации модели и методы могут быть использованы для проектирования и оптимизации других экспериментальных установок, таких как рентгеновские лазеры на основе лазерной плазмы и сильноточные Z-разряды.

Диссертация Тимшиной М.В. имеет логически состоятельную структуру, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 147 страниц, содержит 82 рисунка и 5 таблиц. Большое количество рисунков говорит о высокой наглядности представленного материала.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные цели работы и положения, выносимые на защиту, определены научная новизна

и практическая значимость результатов, представлены личное участие и научные публикации автора, а также апробация полученных результатов.

**Первая глава** является литературным обзором работ, связанных с разработкой и применением различных плазменных источников излучения. Она посвящена фундаментальным аспектам плазмы многозарядных ионов, её свойствам, методам создания и современным областям применения. Рассматриваются также основные способы генерации такой плазмы (лазерный и разрядный), её уникальные характеристики и перспективы использования в качестве источника когерентного и некогерентного излучения в спектральном диапазоне длин волн от 1 нм до 50 нм в таких областях, как микроскопия, диагностика материалов, биомедицинские исследования.

**Вторая глава** описывает разработку кинетической модели для расчета ионизационного состава плазмы. Проанализированы характерные времена процессов в плазме, включая гидродинамические, рекомбинационные и переходные процессы. Построены границы применимости столкновительно-радиационной модели, а также условия локального термодинамического и коронального равновесия. Проведены расчеты среднего заряда ионов для различных условий плотности и температуры. Для оценки характеристик излучения в оптически тонкой плазме использованы приближенные формулы для тормозного, рекомбинационного и линейчатого излучений. Рассчитаны коэффициенты усиления лазерного излучения на примере никелеподобных ионов золота и неодима. Показано, что при размерах плазмы порядка 10 мкм и лоренцевском уширении возможен коэффициент усиления порядка  $1 \text{ см}^{-1}$ .

**Третья глава** посвящена численному моделированию скользящего разряда (СР) в диэлектрической трубке, используемого для пред-ионизации среды перед основным капиллярным разрядом. Рассматривается распространение разряда вдоль поверхности капилляра, его зависимость от давления газа, геометрии системы и свойств материалов. Показано, что процесс распространения СР схож с быстрой волной ионизации, причём степень локализации заряженных частиц у стенок капилляра зависит от давления газа. Использовалась жидкостная модель («simple fluid») с уравнениями Пуассона, неразрывности и дрейф-диффузии, дополненная уравнением заряда поверхности диэлектрика, причём для учета энергии частиц введена расширенная модель, включающая баланс энергии и тепловые эффекты. Расчеты проведены с помощью пакета Comsol Multiphysics с использованием реальных параметров капилляра, заполненного аргоном (давление 0,4–30 Торр, радиус капилляра 1–3 мм, ток 10–50 А).

В четвертой главе приведены результаты численного моделирования сильноточного Z-разряда с высоким аспектным отношением, его применению в формировании активной среды для рентгеновских лазеров. Рассмотрены вопросы динамики плазмы, ступенчатого нагрева и возможности реализации усиления в диапазоне экстремального ультрафиолета (ЭУФ). В расчётах использовалась одномерное приближение магнито-радиационно-газодинамической (МРГД) модели, в котором параметры плазмы зависят только от радиуса и времени. Были рассчитаны балансы энергий, подтверждающие, что 50-60% введенной энергии расходуется на излучение. Исследовано пинчевание ксеноновой плазмы, показано, что ступенчатая накачка позволяет существенно повысить средний заряд ионов и температуру до 600 эВ. Также проведены расчеты для никелеподобного ксенона и водородоподобного азота, показавшие, что при больших токах короткого разряда возможно получение плазмы с параметрами, необходимыми для усиления в более коротковолновой области длин волн до 10 нм.

Пятая глава посвящена численному моделированию лазерной плазмы как активной среды ЭУФ-лазеров. Использовалась радиационно-гидродинамическая модель в одномерном двух-температурном приближении при рассмотрении цилиндрической плазмы, образующейся при воздействии нано- и пикосекундных лазерных импульсов умеренной интенсивности ( $<10^{15}$  Вт/см<sup>2</sup>). Разработана математическая модель динамики плазмы, которая учитывает поглощение лазерного излучения, ионизацию и рекомбинацию, причём проведена верификация модели путем сравнения результатов с экспериментальными данными, полученными на лазерной установке "Вулкан" и расчетами других исследователей.

**Заключение** подводит итоги исследования, формулирует основные выводы и намечает направления дальнейших исследований.

Несмотря на однозначно положительное впечатление от диссертационной работы Тимшиной М.В. считаю необходимым сделать следующие замечания:

1. В главе 2 автор рассматривает доплеровское и лоренцевское уширение, но не анализирует возможное влияние эффектов повышения давления и соответственного столкновительного уширения. В условиях рассматриваемой относительно высокой плотности возможны существенные отклонения от стандартных контуров.

2. В качестве материалов плазмы в главе 2 рассматриваются золото и неодим. Хотелось бы увидеть обсуждение, насколько полученные выводы могут быть экстраполированы на другие многозарядные ионы (например, переходные металлы).
3. В главе 3 было бы полезным обсудить границы применения используемой жидкостной модели и её возможные отклонения от альтернативных кинетических моделей или PIC-методов, например, при малых давлениях или сильной ионизации. Основное внимание автором уделено ударной ионизации, но не рассматривается возможный вклад фото-ионизации, объемных разрядов или автоэлектронной эмиссии.
4. В главе 3 также говорится, что запуск основного импульса лучше проводить через 6-8 мкс, но не поясняется, почему именно в этот момент условия наиболее благоприятны. Можно было бы добавить более подробный анализ влияния запаздывания импульса на характеристики разряда.
5. В главе 4 указано, что эффект перепоглощения резонансного излучения может уменьшить коэффициент усиления, но не представлено численной оценки этого влияния.
6. Необходимо отметить, что в главе 4 недостаточно подробно рассмотрено влияние неоднородностей и неустойчивостей на формирование активной среды лазера. В реальных системах могут возникать осевые и радиальные градиенты температуры и плотности, что может снизить эффективность усиления. Было бы также полезно определить, при каких критических значениях напряжения, тока и давления начальная стадия разряда становится неустойчивой или разрушительной для капилляра.
7. Есть ряд замечаний по качеству оформления диссертации. Во-первых, далеко не все переменные в представленных формулах явно и в надлежащем месте обозначены, некоторые приведённые формулы, взятые из других работ, всегда должны быть отмечены соответствующей ссылкой на первоисточник. Некоторая небрежность отмечается и при оформлении рисунков. Например, на Рис.1.3 изображен не комплекс EuXFEL (ФРГ), а

SACLA/SPING-8 (Япония), цветные кривые на Рис.2.2 не обозначены, подпись к Рис.3.15, по-видимому, ошибочна.

Описанные выше недостатки не снижают общий высокий уровень научной и практической значимости работы. Можно предположить, что сам автор адекватно оценивает используемые приближения и ограничения и предлагает пути их преодоления в дальнейших исследованиях.

В целом диссертация Тимшиной М.В. является самостоятельным и завершённым исследованием, содержащим важные научные и практические результаты. Работа выполнена на высоком научном уровне и демонстрирует глубокое понимание автором сложных физических процессов, связанных с ионизацией, динамикой плазмы и её взаимодействием с электромагнитными полями. В работе предложены физико-математические модели для численного моделирования плазмы многозарядных ионов, рассмотрены различные аспекты физики плазмы, включая процессы ионизации, рекомбинации, переноса энергии и излучения. Автор также исследует динамику плазмы в различных условиях, таких как скользящий разряд и сильноточный Z-разряд. Это делает диссертацию комплексным исследованием, охватывающим как теоретические, так и прикладные аспекты.

Особого внимания заслуживает разработка моделей для анализа неравновесного ионного состава плазмы, а также расчёта коэффициентов усиления для переходов в ионах He- и Ni-подобных изоэлектронных последовательностей. Автор также демонстрирует методы управления параметрами плазмы, такие как профилирование формы фронта разряда или лазерного импульса для оптимизации ионного состава. Показана также возможность управлять степенью неоднородности пред-ионизации в капилляре через давление газа, материал и радиус капилляра, величину тока и момент подачи основного импульса.

Предложенные модели и подходы имеют значительный потенциал для дальнейшего использования в исследовательских и прикладных проектах, связанных с генерацией когерентного излучения в коротковолновом диапазоне.

По результатам диссертации опубликовано 12 научных статей в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science или ядро РНИЦ. Личный вклад в совместных публикациях четко обозначен. **Достоверность** полученных результатов не вызывает сомнений.

**Автореферат** диссертации правильно и всесторонне дает представление о проделанной работе, содержит в кратком виде всю необходимую информацию, характеризующую полученные в процессе исследования результаты, основные положения и выводы диссертации. Автореферат и опубликованные работы соответствуют содержанию диссертации.

Диссертационная работа Тимшиной Марии Викторовны на тему «Численное моделирование плазмы многозарядных ионов» удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Тимшина Мария Викторовна заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук (01.04.05 - Оптика),  
высококвалифицированный ведущий научный сотрудник,  
и.о. заведующего лабораторией рентгеновской оптики отделения квантовой радиофизики,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.  
Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)  
Адрес: 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53  
Эл. почта: artjukovia@lebedev.ru  
Телефон +7 (916) 321-98-41

Артюков Игорь Анатольевич  
10 февраля 2025 г.

Даю согласие на обработку персональных данных

Артюков Игорь Анатольевич  
10 февраля 2025 г.

Подпись Артюкова И.А. заверяю

Ученый секретарь ФИАН  
кандидат физико-математических наук

А.В. Колобов  
10 февраля 2025 г.