

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Гарматиной Алены Андреевны

**на тему: «Генерация рентгеновских фотонов при взаимодействии
импульсно-периодического фемтосекундного лазерного излучения
ближнего ИК диапазона с твердотельной мишенью в газовой среде»
по специальности 1.3.19. Лазерная физика**

Появление лазеров с фемтосекундными импульсами открыло новую страницу в истории исследований лазерного взаимодействия с веществом. К основным задачам относятся как лазерная абляция, так и получение источников рентгеновского и терагерцового излучения. Получение изображения внутренней структуры объекта в рентгеновском излучении является важным диагностическим инструментом в медицине и биологии. В настоящее время как задача лазерной абляции, так и создание рентгеновских источников является актуальной темой, в связи с которой остался ряд нерешенных вопросов. Так, например, контроль процесса абляции и интенсивности при взаимодействии с мишенью, расположенной в газовой среде. Уменьшение влияния ионизации газовой среды на доставку излучения до мишени при создании вневакуумного рентгеновского лазерно-плазменного источника являются актуальными задачами, решению которых и посвящена данная диссертационная работа.

Диссертационная работа содержит **введение**, в котором раскрывается актуальность поставленных задач, цели и задачи. Также в нем отражена научная новизна и практическая значимость работы. Представлена апробация работы и список публикаций.

Первая глава диссертационной работы содержит литературный обзор по теме лазерного взаимодействия с мишенью в газовой среде. В главе освещены механизмы генерации рентгеновского излучения и второй гармоники, механизмы лазерной абляции.

Вторая, третья и четвертая главы посвящены экспериментальным исследованиям, сделанным автором.

Во второй главе ставится задача контроля процесса абляции (создания микроканала) по рентгеновскому излучению, образующемуся в горячей плазме. Устанавливается пороговая интенсивность регистрации рентгеновских квантов 10^{14} Вт/см². Уточняется связь интенсивности с температурой горячих электронов, которая оценивается, используя тормозной рентгеновский спектр. Оценивается изменение интенсивности при формировании микроканала в медной мишени толщиной 80 мкм. Проводится оценка интенсивности при формировании в мишени микроканала излучением в режиме филаментации. Так, важным результатом главы является демонстрация эффективности использования рентгеновского сигнала как диагностического инструмента оценки интенсивности, в сложных условиях, где затруднено ее прямое измерение.

В третьей главе решается задача управления влиянием ионизации газовой среды на доставку интенсивного ($10^{14} - 10^{16}$ Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения до мишени путем оптимизации длительности импульса в интересах создания вневакуумного источника характеристического рентгеновского излучения, подходящего для проведения время-разрешенных дифракционных экспериментов. Новым подходом является вариация длительности импульса, которая позволяет минимизировать как потери энергии на ионизацию, так и размер пучка на поверхности мишени, который связан и с размером рентгеновского источника. Тем самым удастся повысить энергию, которую можно доставить до мишени без потерь, и увеличить рентгеновский выход, не используя вакуумную камеру для откачки окружающей атмосферы. Поток рентгеновских фотонов достигает $2 \cdot 10^7$ фот/импульс в 2π ср. Это удовлетворяет требованиям для проведения время-разрешенных дифракционных экспериментов.

В четвертой главе решается задача создания микрофокусного лазероплазменного источника рентгеновского излучения на основе низкоэнергетического высокочастотного фемтосекундного волоконного лазера. В экспериментальной схеме излучение лазера воздействует в режиме острой фокусировки на твердотельную мишень с высокой частотой повторения лазерных импульсов. Исследуются режимы разной частоты следования лазерных импульсов и энергии лазера с тем, чтобы подобрать оптимальные параметры для максимизации рентгеновского выхода. Интересным результатом является нелинейная зависимость выхода фотонов от частоты лазерных импульсов при фиксированной энергии. Максимальный поток рентгеновских фотонов составил $(1.5 \pm 0.5) \cdot 10^9$ фот/с в 2π ср при минимальном диаметре микроплазменной области 8.5 ± 1.6 мкм. Лазерные параметры при этом - 2 МГц, 10 мкДж/импульс. Были проведены эксперименты по получению тестовых рентгеновских изображений, используя данный источник. Практически важным результатом является то, что разработанный и созданный микрофокусный рентгеновский источник нового поколения на базе фемтосекундного низкоэнергетического высокочастотного волоконного лазера может быть альтернативой лабораторным рентгеновским микрофокусным трубкам, а также рентгеновским источникам на базе миллиджоульных лазеров в задачах получения рентгеновских изображений.

В заключении работы сформулированы основные результаты и сделаны выводы. Содержание автореферата и защищаемых положений соответствует тексту диссертации. Описанные в диссертации результаты определенно обладают новизной и также практической значимостью.

При этом работа не свободна от недостатков. Важнейшие из них следующие.

На рис. 1.4. приведены надписи на английском языке. В подписи к рисунку не указано, какие условные обозначения (треугольники или кружки) относятся к скорости абляции, а какие к диаметру кратера.

На стр. 6 в строке 19 введен термин «вакуумная интенсивность», который не является общеупотребительным. Поэтому надо дать определение, что он обозначает. Такое определение дается значительно позже, на стр. 27.

На стр. 14 в строке 18. Имеется грамматическая некорректность: «Результаты докладывались на международной научная конференция».

На стр. 23 в строке 9 употреблен термин «ионизованные электроны», который представляется неудачным. Можно было при первичном упоминании написать «свободные электроны, образовавшиеся в процессе ионизации», а в дальнейшем называть их просто «свободные электроны».

На стр. 36 в строке 2 снизу не указана энергия лазера.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации и оформлен в соответствии с требованиями ВАК.

Таким образом, соискатель Гарматина Алена Андреевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук,

высококвалифицированный старший научный сотрудник Лаборатории воздействия лазерного излучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук,

Кологривов Андрей Александрович

подпись

24.09.2024 Дата подписания

Контактные данные:

тел.: +7(499)132-68-35, e-mail: kologrivovaa@lebedev.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация: 01.04.03-радиофизика, включая квантовую радиофизику

Адрес места работы:

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д.53, ФИАН

Тел.: 8 (499) 132-65-54; e-mail: office@lebedev.ru

Подпись сотрудника ФИАН Кологривова А.А. удостоверяю:

Ученый секретарь ФИАН

А.В. Колобов

дата

24.09.2024