

**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**

Задачи, связанные с лазерно-плазменным взаимодействием, привлекают внимание физиков уже более полувека, однако многие из них остаются актуальными и сегодня. В настоящее время мощные лазеры, генерирующие импульсы фемто- и пикосекундной длительности и воздействующие на мишень, находят все большее применение в различных областях фундаментальных и прикладных исследований. К ним следует отнести, например, оперативную бесконтактную диагностику элементного состава вещества по методу лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии, создание источников терагерцового и рентгеновского диапазона, а также лазерную абляцию материалов.

Диссертационная работа Гарматиной А.А. посвящена экспериментальным исследованиям взаимодействия фемтосекундного лазерного интенсивного излучения с твердотельными мишенями в газовой среде и генерации рентгеновского излучения в результате этого процесса. Рассматриваются вопросы как контроля процесса абляции мишени по рентгеновскому сигналу, так и создания вневакуумного рентгеновского источника, пригодного для время-разрешенных дифракционных экспериментов и получения рентгеновских изображений.

Задача контроля процесса абляции объекта в среде возникает при создании микроканалов в биообъектах, которые нельзя поместить в вакуум. Создание микроканала сопряжено с изменением его формы, что приводит к концентрации и изменению интенсивности создающего канал излучения в

процессе абляции. Для контроля этого процесса необходимо создание методики измерения его ключевых параметров, таких как интенсивность лазерного излучения в микроканале.

При воздействии лазерного излучения с интенсивностью более 10^{13} Вт/см² воздушная приповерхностная среда ионизируется, приводя к потерям на ионизацию и дефокусировке лазерного пучка в образующейся плазме. Возникает вопрос определения реальной интенсивности и плотности энергии на мишени. В рецензируемой работе автором предложена методика оценки интенсивности на мишени и ее изменения в процессе создания микроканала по рентгеновскому сигналу. Примером такой задачи, исследованной автором, служит дистанционное взаимодействие с мишенью излучения в режиме филаментации, при котором интенсивность в филаменте близка к необходимой для генерации рентгеновского сигнала, нелинейно связанного с интенсивностью на мишени.

Еще одной актуальной задачей является создание вневакуумного рентгеновского источника для получения изображений в режиме рентгеновской время-разрешенной дифракции, обладающего высоким потоком фотонов и малыми размерами. Отсутствие вакуумной камеры для источника, работающего в газовой среде, значительно уменьшает проблемы доступа к оптическим элементам установки и предотвращает их загрязнение аблированными микрочастицами. Для минимизации влияния газовой среды на доставку излучения до мишени и повышения рентгеновского выхода автором предложено использовать активно развивающиеся в настоящее время высокочастотные волоконные фемтосекундные лазеры, обладающие малой энергией в импульсе, высокой частотой повторения и стабильностью направления лазерного пучка. Малая интенсивность на мишени должна привести к минимизации влияния ионизации и уменьшению размера источника. Однако при высокой частоте повторения импульсов среда может не успевать релаксировать до начальных параметров за время между

лазерными импульсами, усложняя картину взаимодействия. Поэтому необходимо изучение влияния на этот процесс таких лазерных параметров, как энергия и частота повторения импульсов, и, кроме того, создание методики контроля размера лазерно-плазменной области, являющейся источником рентгеновского излучения.

Таким образом, тема диссертационной работы является важной и **актуальной** и имеет **перспективы практических применений**.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с твердотельной мишенью в газовой среде. Рассмотрены особенности абляции мишеней фемтосекундными импульсами, а также механизмы генерации рентгеновского излучения и второй гармоники. Особое внимание уделено нелинейным эффектам, связанным с ионизацией среды перед мишенью. Результаты экспериментальных исследований представлены во второй, третьей и четвертой главах диссертаций.

Вторая глава посвящена использованию рентгеновского излучения как диагностического инструмента при фемтосекундной лазерной абляции мишени. Основным выводом является утверждение о том, что лазерно-индуцированное рентгеновское излучение может быть использовано для контроля динамики изменения лазерной интенсивности в процессе создания микроканала в твердотельной мишени, а также для диагностики послойного процесса абляции многослойной мишени. Проведена оценка величины лазерной интенсивности в микроканале, сформированном в мишени фемтосекундным лазерным монофиламентом, с использованием сигнала рентгеновского излучения, сопровождающего абляцию мишени.

Третья глава посвящена минимизации влияния ионизации газовой среды на доставку интенсивного лазерного излучения до мишени для повышения выхода рентгеновского излучения при создании лазерно-

плазменного рентгеновского источника. Кроме известной методики увеличения максимальной интенсивности на мишени путем замены воздушной среды на гелий, поддуваемый в область взаимодействия, исследована роль длительности лазерного импульса и обнаружено, что ее увеличение при фиксированной энергии приводит к уменьшению ионизационных потерь и, соответственно, размера кратера на мишени и увеличению выхода рентгеновского излучения. Полученный поток рентгеновского излучения является максимальным среди известных лазерно-плазменных источников и достаточным для проведения дифракционных экспериментов. Сделан вывод, что ключевым параметром, ответственным за повышение выхода рентгеновского излучения, является увеличение плотности энергии. Подход, основанный на увеличении длительности импульса является новым.

В четвертой главе сообщается о создании нового вневакуумного лазерно-плазменного рентгеновского источника для задач рентгенографии, функционирующего на базе высокочастотного низкоэнергетического фемтосекундного волоконного лазера ($\lambda = 1030$ нм, максимальная мощность $P = 20$ Вт, энергия в импульсе $E \leq 40$ мкДж, частота повторений $f \leq 2.5$ МГц, $\tau = 280$ фс, $NA = 0,2$, интенсивность $I \sim 10^{14}$ Вт/см²). При воздействии на циклически перемещаемую вращающуюся твердотельную мишень, расположенную в воздушной среде, обнаружена нелинейная зависимость выхода рентгеновского излучения от частоты следования воздействующих импульсов. Максимальный поток рентгеновских фотонов составил $(1.5 \pm 0,5) \cdot 10^9$ фот/с/2 π ср при минимальном диаметре микроплазменной области 8.5 ± 1.6 мкм. При этом размер этой области измерен по сигналу второй оптической гармоники из приповерхностной микроплазмы, используя разработанную в работе специально для этой задачи методику.

В целом проведено большое комплексное исследование, результаты которого являются новыми и актуальными. Положения, выносимые на защиту, сформулированы четко и лаконично.

Однако следует отметить, что качество изложения сильно неоднородно по тексту диссертации. Количество грамматических ошибок, опечаток, пропусков и повторов заметно возрастает при движении от безупречно написанных Введения и главы 1 к концу диссертации. Недостатком является и то, что по ходу изложения результатов своих экспериментов автор перемежает их с отсылками на данные других авторов (о многих из которых уже говорилось в главе 1), что затрудняет восприятие полученного в работе результата. Особенно это ощущается в главе 4. Кроме того, четкость трактовки своих экспериментальных результатов часто смазывается употреблением таких слов как «вероятно», «скорее всего» и им подобных, как, например, во фразе из главы 3: "Уменьшение выхода *скорее всего* связано с уменьшением реальной интенсивности на мишени. В режимах 3 мДж, 300 фс и 6 мДж 1 пс *вероятно* интенсивность на мишени оказывается равной интенсивности, *которая была бы* в вакууме и соответствует значению (при расчетном диаметре пучка в перетяжке 8 мкм) порядка $\sim 10^{16}$ Вт/см² и является, *вероятно*, максимально достижимой при гелиевом поддуве" (курсив наш).

В п.2 основных результатов не указан знак чирпа, при котором достигнуты приведенные параметры, а в п. 4 - не указано, по отношению к чему менялась поляризация лазера.

Не виден скачок амплитуды первого импульса, обсуждаемый в тексте, на приведенном рисунке 2.1.2.

С учетом приведенных ошибок эксперимента сомнительно существование максимума в случае отрицательного чирпа в зависимостях рис. 2.2.4..

На рис. 4.1.2. перепутаны б и в.

Зависимости рентгеновского сигнала и второй гармоники на рис. 4.3.2.б в пределах приведенной ошибки измерений следует считать одинаковыми.

Желательно более детальное объяснение "процесса ионизационной самодефокусировки в двухкомпонентной среде", где "зависающие аблированные частицы вызывают дополнительную ионизацию среды".

Неясно, откуда взялась разница в четырнадцать порядков в коэффициентах конверсии во фразе "коэффициент конверсии во вторую гармонику для электронной плазмы имеет порядок 10^{-20} см²/Вт. Измеренная величина мощности сигнала второй гармоники составила 20 мкВт, таким образом эффективность конверсии составляет порядка 10^{-6} ." (с.109).

Указанные выше замечания не умаляют ценность проведенных исследований и полученных результатов, которые можно классифицировать как новые, обоснованные и имеющие практическое и научное значение.

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. Диссертация 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.

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

Официальный оппонент: доктор физ.-мат. наук, профессор, г.н.с., и.о. зав.
лабораторией спектроскопии ультрабыстрых процессов Института
спектроскопии РАН "ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ СПЕКТРОСКОПИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК"

ЧЕКАЛИН Сергей Васильевич

Дата подписания

18.09.2024 г.

Контактные данные:

тел.: +7(495)851-02-37, e-mail: chekalin@isan.troitsk.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.04.05 – «оптика»

Адрес места работы:

108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5

Институт спектроскопии РАН, лаборатория спектроскопии ультрабыстрых
процессов.

Тел. 8(495) 851-02-37, e-mail: chekalin@isan.troitsk.ru

Подпись д.ф.-м.н., проф. Сергея Васильевича Чекалина удостоверяю:

Ученый секретарь ИСАН к.ф.-м.н.

Р.Р. Кильдиярова

Дата