

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Гарматина Алена Андреевна

**Генерация рентгеновских фотонов при взаимодействии
импульсно-периодического фемтосекундного лазерного
излучения ближнего ИК диапазона с твердотельной
мишенью в газовой среде**

1.3.19. Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Диссертация подготовлена на кафедре общей физики и волновых процессов
физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова

- | | |
|----------------------------------|--|
| Научный
руководитель | – Гордиенко Вячеслав Михайлович,
<i>доктор физико-математических наук,
профессор</i> |
| Официальные
оппоненты | – Першин Сергей Михайлович,
<i>доктор физико-математических наук,
Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, отдел волновых
явлений, главный научный сотрудник</i>
Чекалин Сергей Васильевич,
<i>доктор физико-математических наук,
профессор, Институт спектроскопии РАН,
лаборатория спектроскопии ультрабыстрых
процессов, гл. научн. сотр., и.о. заведующего
лабораторией</i>
Кологривов Андрей Александрович,
<i>кандидат физико-математических наук,
Физический институт имени П.Н. Лебедева
РАН, лаборатория воздействия лазерного
излучения, высококвалифицированный старший
научный сотрудник</i> |

Защита диссертации состоится «2» октября 2024 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.013.4 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 62, корпус нелинейной оптики, ауд. имени С.А. Ахманова

E-mail diss.sov.31@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3079>

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.4,
кандидат физ.-мат. наук

Коновко Андрей Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы и степень ее разработанности

В настоящее время мощные лазеры, генерирующие импульсы фемто- и пикосекундной длительности и воздействующие на мишень в режиме генерации микроплазмы, 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 [1], создание источников терагерцового [2] и рентгеновского [3] диапазона, а также лазерную абляцию материалов [4].

Лазерно-индуцированная абляция, сопровождающаяся возникновением плазмы при плотностях энергии $1 - 100 \text{ Дж/см}^2$, обеспечивает создание микроструктур и микроканалов как в металлах, так и в диэлектриках, что является предметом активных исследований в последние годы [5–7]. Для медицинских приложений часто требуется оптимизировать условия создания микроканалов в биообъектах, таких как, например, костная ткань [8]. В элементах микроэлектроники возникает потребность создания микроотверстий для установки межслойных контактов [9]. Абляция также используется и в аэрокосмической отрасли для изготовления охлаждающих отверстий в газовых турбинах [7]. Обработка материала сверхкороткими импульсами позволяет создавать аккуратные каналы, сопоставимые по длине с размером лазерной перетяжки.

На модифицированной поверхности, которую представляет собой кратер и микроканал, возможно увеличение поглощения лазерного излучения и рост интенсивности за счет увеличения локального поля. В глубоком канале вероятна агрегация аблированных микрочастиц, которые будут препятствовать доставке лазерного излучения на дно [10]. Обычно микрообработка проводится в условиях газовой среды, наличие которой приводит к ионизационным потерям энергии и дефокусировке лазерного пучка [11]. В случае дистанционной микрообработки с помощью фемтосекундного филамента [12], в самом филаменте может происходить трансформация спектра и длительности импульса [13,14], что в свою очередь может влиять на его интенсивность. Все эти процессы показывают, что контроль величины лазерной интенсивности на мишени в процессе создания микроканала является необходимым для мониторинга режима воздействия. При этом, отметим, что если обрабатываемые объекты представляют собой сэндвич-структуры [8,9], то часто требуется контролировать процесс послойной перфорации отдельных слоев в процессе лазерной абляции.

Известно [15], что при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью более 10^{13} Вт/см^2 (что соответствует плотности энергии 1 Дж/см^2

при длительности импульсов 100 фс) на твердотельную мишень, процесс лазерно-плазменной абляции сопровождается генерацией рентгеновских фотонов. Выход рентгеновского излучения определяется не только лазерной интенсивностью, но и материалом мишени (атомным номером, и соответственно, числом свободных электронов) [16,17]. Таким образом, связь выхода рентгеновского излучения с величиной лазерной интенсивности может быть использована для создания методики оценки уровня интенсивности на мишени, а также мониторинга динамики ее изменения в процессе создания микроканала. В то же время связь выхода рентгеновского излучения с атомным номером материала мишени может быть использована для контроля материала мишени при переходе между слоями многослойных структур в процессе абляции. Это позволяет использовать возникающее рентгеновское излучение для диагностики процесса изменения интенсивности в процессе создания микроканала при фемтосекундной лазерной абляции, а также для диагностики межслойных переходов при абляции многослойных структур. Стоит отметить, что до настоящего времени не проводилось исследований, связанных с определением возможности использования рентгеновского излучения для *in situ* диагностики таких процессов.

Рентгеновское излучение является мощным диагностическим инструментом, используемым в физике твердого тела, кристаллографии, микроскопии, спектроскопии, и др. [18]. В последние годы, было показано, что фемтосекундные лазерно-плазменные источники могут излучать сверхкороткие рентгеновские импульсы [19], что позволяет их применять для проведения рентгено-структурной диагностики с высоким временным разрешением [18].

В стандартной схеме лазерно-плазменного рентгеновского источника, используемого для время-разрешенных дифракционных экспериментов, сверхинтенсивное ($10^{16} - 10^{18}$ Вт/см² с частотой воздействующих импульсов 10 Гц – 1 кГц) фемтосекундное лазерное излучение взаимодействует с металлической мишенью (обычно медь или молибден) расположенной в вакуумной камере, что создает мощный лазерно-плазменный рентгеновский источник характеристических фотонов с потоком $10^8 - 10^{10}$ фот/с/2 π ср [20,21]. Однако проблемой такой схемы являются неизбежное загрязнение вакуумной камеры разлетающимися продуктами абляции мишени, громоздкие размеры самой камеры, трудности размещения в ней элементов, а также необходимость элементов автоматизации, что делают такую схему сложной в использовании.

Альтернативная схема опирается на создание вневакуумного лазерно-плазменного рентгеновского источника. Во вневакуумных условиях, окружающая мишень газовая среда предотвращает разлет продуктов абляции и загрязнение фокусирующей оптики и иных устройств. Однако, в воздушной среде, при достижении лазерной интенсивности порядка 10^{13} Вт/см², возникает ионизация газа, изменяющая показатель преломления за счет появления электронной компоненты и

создающая условия для самодефокусировки, что приводит к потерям энергии в лазерном пучке [11]. Все эти факторы приводят к ограничению доставляемой на мишень интенсивности, а значит, и к понижению выхода рентгеновского излучения.

Пороговую интенсивность лазерного излучения, которая определяет условия возникновения ионизации, можно увеличить за счет замены воздуха на газ с большим потенциалом ионизации – например, на гелий, который имеет почти в 2 раза больший потенциал ионизации, чем воздух – 24,6 эВ [11]. Это позволяет оптимизировать доставляемую на мишень интенсивность и повысить выход рентгеновских фотонов при создании лазерно-индуцированного микроплазменного источника [22]. Однако, при достижении вакуумной интенсивности порядка 10^{15} Вт/см² гелий также ионизируется [23]. Поэтому актуальной является задача оптимизации такой схемы с точки зрения доставки энергии на мишень при варьировании лазерных параметров (например, длительность импульса) для увеличения выхода рентгеновского излучения.

Для задачи получения рентгеновского фазо-контрастного изображения кроме высокого потока фотонов требуется также использовать рентгеновский источник минимального диаметра для получения качественного пространственного разрешения [24,25]. При решении такой задачи обычно используются рентгеновские трубки, [18,26], которые излучают непрерывный поток рентгеновских фотонов, в спектре которого содержится как характеристическое так и тормозное излучение. Изготавливаемые в РФ микрофокусные трубки имеют минимальный размер пятна на аноде не менее 20 мкм [27]. Альтернативой им могут быть лазеро-плазменные рентгеновские источники. В стандартной схеме в настоящее время используется излучение импульсно-периодических (10 Гц – 1 кГц) фемтосекундных милиджоульных лазеров, которое при острой фокусировке на мишень обеспечивает в фокальном пятне диаметром около 4 мкм интенсивность $10^{16} - 10^{18}$ Вт/см² [20,21,28]. При этом, размер рентгеновского источника обычно оказывается в 2 – 5 раз больше диаметра лазерной перетяжки и составляет не менее 8 – 15 мкм [20,21,28]. Увеличение размера происходит в основном за счет диффузии высокоэнергетических электронов, которые возникают в микроплазме при воздействии фемтосекундного лазерного излучения с высокой интенсивностью на мишень.

Новые возможности предоставляют современные фемтосекундные волоконные лазеры, которые достаточно компактны и просты в использовании, а также имеют относительно высокое качество лазерного излучения ($M^2 < 1,5$). Такие лазеры нашли применение, например, в задачах прецизионной микрообработки материалов [4]. Максимальная энергия в лазерном импульсе коммерчески доступных фемтосекундных волоконных лазерах варьируется в пределах 10 – 100 мкДж, при длительности импульса 0,3 – 3 пс [29]. Достоинством таких лазеров является способность работать с высокой частотой следования импульсов в единицы-десятки мегагерц (а в режиме генерации пачек импульсов еще выше), за счет чего

достигается и высокая средняя мощность в десятки ватт [30]. Остро фокусируя лазерное излучение микроджоульного уровня можно достичь интенсивности на мишени порядка 10^{14} Вт/см², достаточной для зажигания горячей микроплазмы и, соответственно, генерации рентгеновского излучения [15]. При этом высокий поток рентгеновских фотонов за секунду может быть достигнут за счет высокой частоты следования импульсов. Таким образом, следует ожидать, что использование фемтосекундного низкоэнергетического высокочастотного волоконного лазера в режиме микроплазменной генерации для создания лазерно-плазменного рентгеновского источника позволит выйти на новый уровень микрофокусных рентгеновских источников, что также потребует и разработку методики контроля размера источника в режиме реального времени.

Цели и задачи работы

Целью работы является исследование возможности использования рентгеновского сигнала, получаемого при воздействии фемтосекундного лазерного излучения, сфокусированного на твердотельную мишень в газовой среде, в качестве диагностического инструмента процесса абляции мишени, а также экспериментальной разработке методов повышения выхода рентгеновского излучения с целью создания источника рентгеновского излучения для задач радиологии.

Для этого были поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследование возможности использования лазерно-индуцированного рентгеновского излучения для контроля динамики изменения лазерной интенсивности и оценки ее среднего значения в лазерно-плазменном процессе формирования микроканала в твердотельной мишени, а также для диагностики послойного процесса абляции многослойной мишени.
2. Управление 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.
3. Создание микрофокусного лазерно-плазменного источника рентгеновского излучения на основе излучения низкоэнергетического высокочастотного фемтосекундного волоконного лазера, воздействующего в режиме острой фокусировки на твердотельную мишенью, в газовой среде, и разработка методики оценки размера полученной микроплазменной области, ответственной за генерацию рентгеновского излучения.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования в диссертационной работе является рентгеновское излучение, возникающее в приповерхностной горячей микроплазме, инициируемой фемтосекундным лазерным излучением.

Предметом исследования в диссертационной работе являются методы управления выходом рентгеновских фотонов в результате оптимизации параметров фемтосекундного лазерного излучения при фокусировке на твердотельную мишень, находящуюся в газовой среде.

Научная новизна

1. Установлено, что лазерно-индуцированное рентгеновское излучение может быть использовано для контроля динамики изменения лазерной интенсивности в лазерно-плазменном 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.
2. Обнаружено, что, управление длительностью остросфокусированного ($NA = 0.1; 0.4$, $f = 10$ Гц) фемтосекундного лазерного излучения позволяет минимизировать влияние ионизированных электронов газовой среды (воздух, гелиевый поддув) на доставку лазерного излучения до мишени. Установлено, что при воздействии сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов ($\lambda = 0.8$ мкм, $E = 6$ мДж, $NA = 0.1$) на медную мишень при гелиевом поддуве, выход характеристического ($Cu K_\alpha$) рентгеновского излучения возрастает в 10 раз при увеличении длительности импульса с 30 фс до 300 фс и достигает $2 \cdot 10^7$ фот/импульс/2 π ср. Это удовлетворяет требованиям для проведения время-разрешенных дифракционных экспериментов.
3. Впервые создан вневакуумный микрофокусный лазерно-плазменный рентгеновский источник для задач рентгенографии, функционирующий 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 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.

4. Разработана методика оценки диаметра микроплазменной области, ответственной за генерацию рентгеновского излучения в режиме острой фокусировки излучения фемтосекундного волоконного лазера ($\lambda = 1030$ нм, энергия в импульсе $E \leq 40$ мкДж, частота повторений $f = 0.8 - 2.5$ МГц, $\tau = 280$ фс, $NA = 0.2$, $I \sim 10^{14}$ Вт/см²) на медную мишень, расположенную во вневакуумных условиях (воздух), по сигналу второй оптической гармоники из приповерхностной микроплазмы.

Научная и практическая значимость

Получение оценки интенсивности сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения, мониторинг изменения интенсивности в процессе лазерно-плазменного формирования микроканала в мишени, а также диагностика послойного процесса абляции мишени по регистрируемому рентгеновскому сигналу. практически значимы при создании новых фемтосекундных лазерных технологий, относящихся, например, к микрообработке элементов микроэлектроники, микрохирургии твердых биотканей и др.

Продemonстрированная методика снижения дефокусирующего влияния электронов, возникающих в результате ионизации окружающего газа, за счет управления длительностью фемтосекундных лазерных импульсов открывает возможности оптимизации величины лазерной интенсивности на мишени при создании вневакуумного источника рентгеновских фотонов для проведения время-разрешенных дифракционных экспериментов. Также методика позволяет оптимизировать размер кратера в режиме лазерно-плазменной микрообработки материалов.

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 мелиджоульных лазеров, и позволяет проводить рентгеновские абсорбционные измерения микрообъектов, а также получать фазово-контрастные изображения биологических и иных объектов.

Разработана методика, позволяющая по сигналу обратно отраженной второй оптической гармоники контролировать в реальном времени размер микроплазменной области, что может быть использовано для мониторинга процесса лазерно-плазменной микрообработки материалов в реальном времени и контроля размера микрофокусного лазерно-плазменного рентгеновского источника.

Методология исследования

Экспериментальные методы исследования включали в себя разработку оптических схем генерации рентгеновского излучения, регистрации сигнала второй оптической гармоники, возникающей в лазерной микроплазме, формируемой при импульсно-периодическом воздействии сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов на твердотельную мишень, находящуюся в газовой среде. Экспериментальные методы также включали в себя разработку методов повышения выхода рентгеновского излучения путем управления параметрами лазерного излучения - длительностью лазерного импульса, энергии и частоты следования лазерных импульсов.

Защищаемые положения

1. Процесс создания лазерно-плазменного микроканала в мишени последовательностью сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов сопровождается генерацией рентгеновского излучения, которое может использоваться для оценки величины интенсивности и динамики ее изменения при формировании микроканала.
2. Управляя длительностью интенсивного фемтосекундного лазерного импульса, можно минимизировать влияние ионизации газовой среды (воздух, гелий), сопровождающейся ионизационными потерями и дефокусировкой лазерного пучка при его доставке на мишень. Показано, что изменение длительности импульса в диапазоне от 30 фс до 300 фс воздействующего на медную мишень излучения Ti:Sa лазера ($\lambda = 800$ нм, $E = 6$ мДж, $f = 10$ Гц, $NA = 0.1$) обеспечивает увеличение выхода характеристического рентгеновского излучения в 10 раз и в случае гелия выход достигает величины $2 \cdot 10^7$ фот/импульс/2πср.
3. Остро фокусируя излучение низкоэнергетического фемтосекундного волоконного лазера ($\lambda = 1030$ нм, энергия в импульсе $E = 10$ мкДж, частота повторений $f = 2$ МГц, длительность $\tau = 280$ фс, числовая апертура $NA = 0.2$, вакуумная интенсивность $\sim 10^{14}$ Вт/см²) на расположенную в воздушной среде медную мишень, можно создать микроплазменную область диаметром 8.5 ± 1.6 мкм, являющуюся источником рентгеновского излучения с потоком фотонов $(1.5 \pm 0.5) \cdot 10^9$ фот/с/2πср.
4. Размер лазерно-индуцированной приповерхностной микроплазмы при острой фокусировке на мишень излучения фемтосекундного низкоэнергетического волоконного лазера, может быть определен по сигналу второй гармоники, сопровождающей появление микроплазмы, являющейся источником рентгеновских фотонов.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивалась, в первую очередь, высоким уровнем современного экспериментального оборудования; использованием современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных; согласованием полученных результатов с известными литературными данными; воспроизводимостью результатов, а также публикацией результатов в рецензируемых научных журналах.

Апробация работы

Основные результаты работы опубликованы в 9 научных журналах, объемом 7,3 печатных листа, индексируемых в базах Scopus, WoS, РИНЦ, таких как квантовая электроника, Journal of Applied Physics, оптика и спектроскопия, Laser Physics Letters, Optics Express, Journal of Physics: Conference Series, а также доложено соискателем лично на международной научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2017», (Москва, 2017г), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2018», (Москва, 2018 г), 18 международной конференции «International Conference on Laser Optics ICLO 2018» (Санкт-петербург, 2018), Международной конференции «International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2018» (Москва, 2018 г), V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2019» (Москва, 2019 г), Международной конференции «International symposium “fundamentals of laser assisted micro–and nanotechnologies», (Санкт-петербург, 2019 г), Международной конференции «IV International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2020» (Москва, 2020), VII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз 2021» (Москва, 2021), Международной конференции «V International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2021» (Москва, 2021 г), VIII Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» (Москва, 2022 г), на Международной конференции молодых исследователей и специалистов «Синхротронные и нейтронные методы исследования конденсированных фаз», Москва, РХТУ им. Д. И. Менделеева, (Москва, 2022), на IX Всероссийская научно-практическая конференция производителей рентгеновской техники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет («ЛЭТИ») (Санкт-петербург, 2022 г), на 20 международной конференции «International Conference on Laser Optics ICLO 2022» (Санкт-петербург, 2022), на Международной конференции «International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2023» (Москва, 2023 г), на научной школе молодых ученых «Современная рентгеновская оптика – 2023 (Нижний Новгород, 2023), на Международной конференции « VII International Conference on Ultrafast Optical Science UltrafastLight-2023» (Москва, 2023 г).

Личный вклад

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялось проведение экспериментов, обработка экспериментальных данных, анализ результатов экспериментов, их интерпретация, значительное участие в подготовке полученных результатов к публикации и переписка с редакцией и рецензентами.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав текста, заключения, благодарностей, а также списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 136 страниц, включая 48 рисунков. Список цитируемой литературы содержит 145 наименований.

Содержание работы

В **первой** главе приведен обзор литературы по проблеме нелинейно-оптического взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с твердотельными мишенями в режиме генерации приповерхностной плазмы и последующего процесса абляции, происходящего преимущественно в газовой среде. Рассмотрены особенности фемтосекундной лазерной абляции металлов и генерации рентгеновского излучения и второй гармоники, сопровождающих этот процесс. Уделено внимание механизмам увеличения выхода рентгеновского излучения при взаимодействии сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения с мишенями, в т.ч. с модифицированной поверхностью, включая режим формирования микроканалов. Особое внимание уделено проблеме доставки излучения до мишени, связанной с нелинейными эффектами при ионизации среды перед мишенью. Рассмотрены особенности процесса дистанционного взаимодействия лазерного излучения в режиме филаментации с твердотельной мишенью, обсуждаются проблемы, связанные с оценкой лазерной интенсивности в нем. Описаны особенности взаимодействия с мишенью сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов, следующих с высокой частотой повторения.

Вторая глава посвящена использованию лазерно-индуцированного рентгеновского излучения в качестве диагностического инструмента при фемтосекундной абляции твердотельной мишени.

В **параграфе 2.1.** проводятся данные экспериментальных исследований возможности использования лазерно-индуцированного рентгеновского излучения, возникающего при воздействии последовательности мягкосфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов ($NA \sim 0.03$) с вакуумной интенсивностью $\sim 10^{14}$ Вт/см² на твердотельную мишень, в режиме создания микроканала, для отслеживания динамики изменения лазерной интенсивности и создания методики оценки средней лазерной интенсивности в таком канале. Показано, что абляция мишени сопровождается выходом рентгеновского излучения при интенсивности на

поверхности более чем 10^{14} Вт/см², при этом выход рентгеновского излучения возрастает до 7 раз при создании микроканала в медной фольге толщиной 80 мкм (рис 1 а). Установлено, что поток рентгеновского излучения связан с интенсивностью как $Y \sim I^{2,5}$ (рис. 1 б) и, таким образом показано, что выход рентгеновского излучения может быть использован для контроля изменения интенсивности в микроканале. Был измерен тормозной спектр рентгеновского излучения и оценена температура горячих электронов. Было уточнена связь температуры горячих электронов с лазерной интенсивностью, задаваемая формулой для резонансного поглощения энергий $T_{hot} \cong A(I\lambda^2)^{1/3}$, с коэффициентом пропорциональности $A = 5.2 \pm 0.3$ [31] для условий интенсивностей порядка 10^{14} Вт/см² воздействующего излучения в режиме формирования микроканала в мишени и установлено, что рентгеновский спектр может быть использован для оценки реальной интенсивности на мишени в режиме воздействия лазерного излучения на модифицированную поверхность.

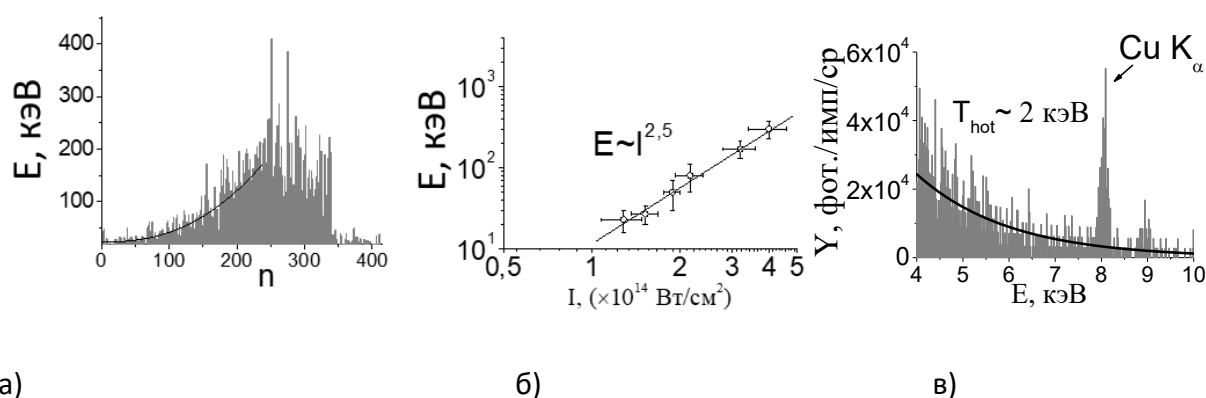


Рис.1 Интегральная энергия рентгеновских фотонов, регистрируемых ФЭУ-РИ (Е) в зависимости от номера лазерного импульса (n) при формировании микроканала в медной мишени при интенсивности на поверхности мишени $\sim 10^{14}$ Вт/см² (а), зависимость интегральной энергии рентгеновских квантов, регистрируемых ФЭУ-РИ от лазерной интенсивности на поверхности медной мишени (б), восстановленный рентгеновский спектр меди в диапазоне энергий 4-10 кэВ (с учетом пропускания слоя воздуха между источником и детектором). Интенсивность лазерного излучения на поверхности мишени $(3.2 \pm 1,1) \cdot 10^{14}$ Вт/см². Полное время регистрации 15 минут (в).

В параграфе 2.2 обнаружено, что воздействие лазерного излучения ($\lambda = 0,8$ мкм, $E = 1 - 6$ мДж, $NA = 0,008$, $P \sim (3 - 5)P_{кр}$, $\tau = 60 - 500$ фс) на твердотельную мишень в режиме филаментации сопровождается регистрацией рентгеновского излучения (рис 2. а). Показано, что скорость абляции и выход рентгеновского излучения повышается при использовании chirpированных импульсов для создания такого монофиламента (см рис. 2 б). Проведена оценка интенсивности в монофиламенте, используя тормозной рентгеновский спектр при формировании микроканала в мишени. Получено, что в режиме chirpированного импульса 500 фс, энергии в импульсе 6 мДж при положении мишени на расстоянии 100 см от линзы, где выход рентгеновского излучения был максимален, температура горячих электронов

составляет 1.4 ± 0.2 кэВ. Соответствующая интенсивность составляет $I \sim 2.0 \pm 0.3$ Вт/см².

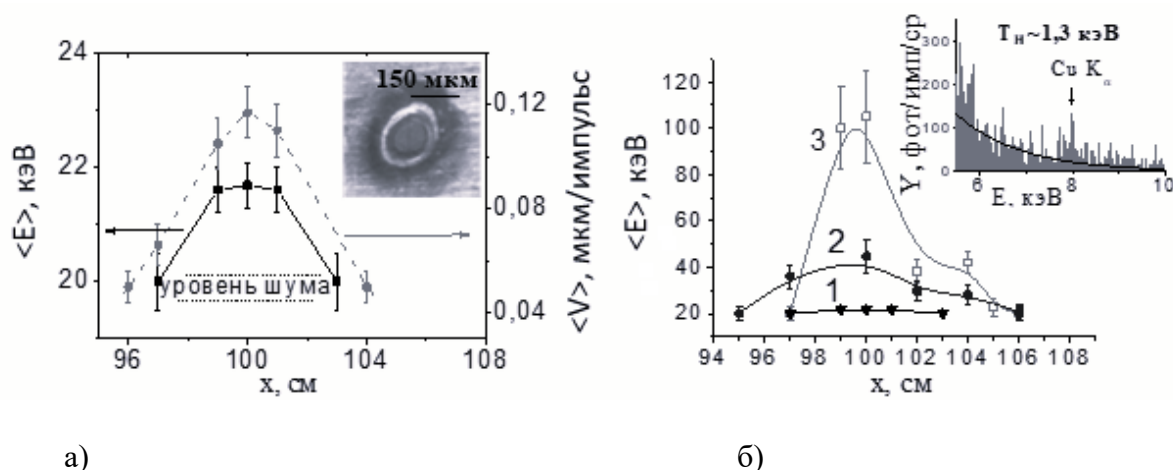


Рис.2. Средняя энергия рентгеновских фотонов $\langle E \rangle$ (сплошная линия) и средняя скорость абляции $\langle V \rangle$ (пунктирная линия) в зависимости от расстояния между линзой и мишенью (x) при энергии лазерного импульса 1 мДж. На врезке - изображение отверстия в медной фольге, образованного монофиламентом в точке фокуса ($x = 100$ см) (а). Зависимость средней энергии рентгеновских фотонов $\langle E \rangle$ за импульс от расстояния между линзой и мишенью: для спектрально-ограниченного (1), отрицательно (2) и положительно (3) чирпированных импульсов длительностью 500 фс, энергия в импульсе – 6 мДж; на врезке - рентгеновский спектр, регистрируемый при формировании канала в медной при воздействии излучения в режиме филаментации (положение мишени $x=100$ см). (б)

В параграфе 2.3 показана возможность использования лазерно-индуцированного рентгеновского сигнала в качестве обратной связи при мониторинге послойной абляции многослойной мишени при воздействии импульсно-периодического сфокусированного фемтосекундного излучения Cr:forsterite лазера ($\lambda = 1240$ нм, $E \sim 700$ мкДж, $f = 10$ Гц, $\tau = 200$ фс, $NA = 0,07 - 0,1$) на поверхность многослойной структуры в режиме создания микроканала. Эффективность методики показана на примере одно-четырехслойного сендвича, состоящего из четырех слоев титановых фольг толщиной 50 мкм, склеенных двустороннем скотчем (рис. 3 а). В качестве мишени также использовалась структура, моделирующая костную ткань - куриное яйцо (скорлупа с белковой подложкой). Показано, что моменты перфорации титановых слоев и скорлупы различимы по спаду сигнала рентгеновского излучения.

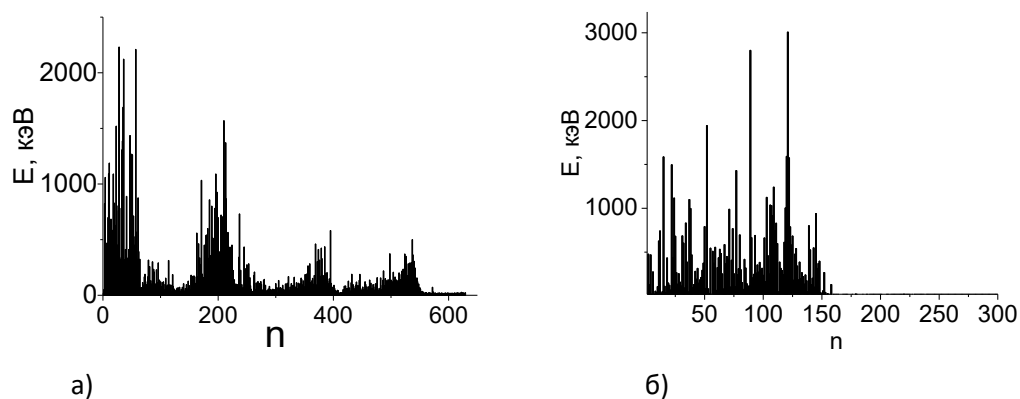


Рис.3. Амплитуда выхода рентгеновского излучения (E) при абляции мишени, состоящей из трех слоев титановых фольг, скрепленных скотчем (n) (а), амплитуда выхода рентгеновского излучения (E) при абляции оболочки куриного яйца (скорлупа и прилегающий слой белка) при заглублении лазерного фокуса на 200 мкм от номера лазерного импульса (n) (б).

Третья глава посвящена исследованию минимизации влияния процесса ионизации газовой среды (потери энергии, дефокусировка пучка) на доставку лазерного фемтосекундного интенсивного излучения до мишени с использованием гелиевого поддува и изменения длительности лазерного импульса.

Параграф 3.1 посвящен получению спектрально яркого рентгеновского излучения (6,4 кэВ) при фокусировке ($NA=0.03$ и 0.1) фемтосекундного Cr:forsterite лазерного излучения с энергией лазерного импульса $E < 1,5$ мДж и интенсивностью $10^{14} - 10^{16}$ Вт/см² на структурированную ленту, содержащую наночастицы диоксида железа. Исследуется вопрос о влиянии параметров фемтосекундного лазерного излучения (ориентация линейной поляризации, интенсивность), а также структуры приповерхностного слоя ленты (размера наностержней), на выход рентгеновского излучения. Установлено, что Р-поляризация излучения обеспечивает увеличение выхода рентгеновского излучения до 1,5 раз. Также изучается вопрос о возможности минимизации влияния ионизации приповерхностной газовой среды на доставку лазерного излучения до мишени и увеличения выхода рентгеновского излучения путем введения гелиевого поддува в зону перетяжки и за счет управления длительностью лазерного импульса. Получено, что гелиевый поддув и увеличение длительности импульса обеспечивают увеличение температуры электронов до 2 раз при расчетной интенсивности излучения на поверхности пленки порядка 10^{16} Вт/см².

Параграф 3.2 посвящён созданию вневакуумного спектрально-яркого источника рентгеновского излучения (характеристическая линия 8 кэВ) пригодного для проведения дифракционных экспериментов, на базе излучения фемтосекундного титан-сапфирового лазера (с интенсивностью до $\sim 10^{17}$ Вт/см²), воздействующего на медную мишень, расположенную в воздухе и при гелиевом поддуве. Исследуется вопрос поиска оптимальных условий (энергия в импульсе, длительность импульса, острота фокусировки) в более широких пределах, чем в

предыдущем параграфе, для получения максимального выхода рентгеновского излучения. Проводятся первые эксперименты по выделению характеристического излучения по схеме дифракции на кристалле кремния. Для экспериментов взята медная мишень, имеющая характеристическую линию $\text{Cu K}\alpha$ с энергией 8 кэВ которая меньше поглощается в воздухе, чем линия железа 6,4 кэВ. В эксперименте получено, что при максимальной энергии 6 мДж, фокусировке $\text{NA}=0.1$ увеличение длительности с 30 до 300 фс приводит к увеличению выхода рентгеновского излучения до 10 раз (рис. 4 а), при этом в условиях гелиевого поддува поток фотонов достигает $2 \cdot 10^7$ фот/импульс/ 2π ср, что является максимальным для вневакуумных условий и удовлетворяет необходимым условиям проведения дифракционных экспериментов (рис. 4 а). Отметим, что увеличение длительности импульса также приводит к уменьшению потерь на ионизацию (измеренных в отсутствии мишени), а также к уменьшению размера кратера на мишени. Так, потери на ионизацию убывают до ~5% (рис. 4 б) в условиях гелиевого поддува и длительности импульса 300 фс, размер кратера уменьшается со ~ 100 мкм до ~ 12 мкм, что подтверждает повышение плотности энергии на мишени при увеличении длительности импульса. Оценка интенсивности максимально достижимой в гелии при данной остроте фокусировке оказывается $\sim 10^{16} \text{Вт/см}^2$.

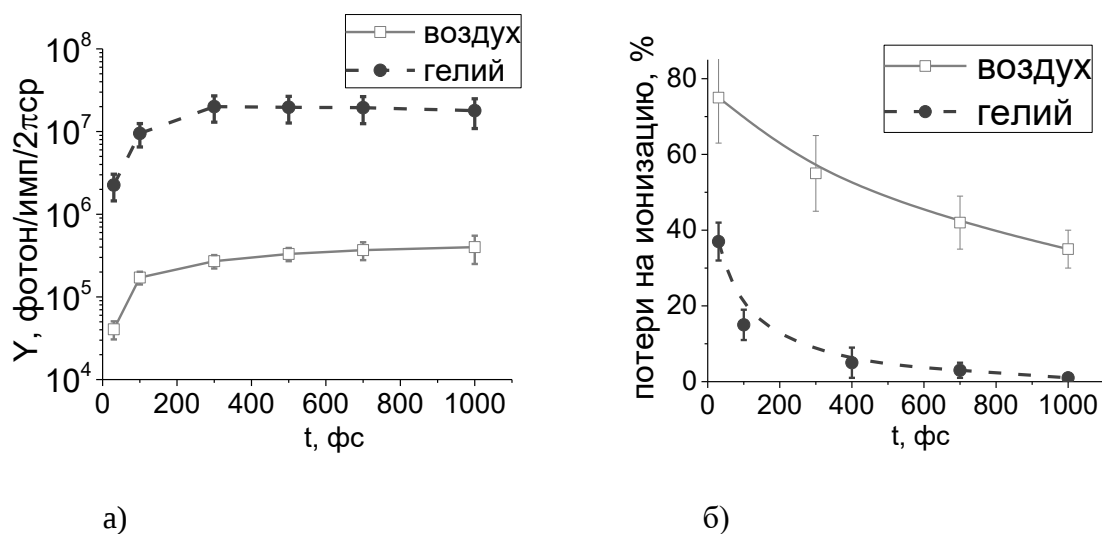


Рис.4 Выход рентгеновского излучения (используя положительно-чирпированные импульсы) в воздухе (квадратные точки) и гелии (круглые точки) (а). Потери на ионизацию в воздухе (квадратные точки) и гелии (круглые точки) (б) от длительности импульса. Лазерная энергия 6 мДж.

Четвертая глава направлена на разработку принципов создания микрофокусного источника рентгеновского излучения с использованием излучения высокочастотного низкоэнергетического волоконного фемтосекундного лазера, остросфокусированного на поверхность металлической мишени, расположенной в воздухе для задач получения рентгеновских изображений.

Параграф 4.1 посвящен исследованию возможности генерации рентгеновского излучения при воздействии остросфокусированных фемтосекундных

лазерных импульсов с энергией в импульсе единицы мкДж с частотой 100 кГц на твердотельные мишени, состоящие из различного материала, имеющего характеристические линии в диапазоне 2-8 кэВ. Установлено, что характеристические линии регистрируются при воздействии на титановую, железную, никелевую, медную мишени излучения с энергией 3 мкДж, острогофокусированного ($NA \sim 0,3$) на поверхность мишени с интенсивностью $\sim 10^{14} \text{ Вт/см}^2$.

В Параграфе 4.2 описываются эксперименты по подбору оптимальных лазерных параметров (частоте воздействия в диапазоне 0,1 – 2,5 МГц и энергии в импульсе $E \leq 40$ мкДж) для получения рентгеновского источника с максимальным потоком фотонов в схеме воздействия острогофокусированного излучения волоконного лазера на циклически перемещаемый медный цилиндр. Скорость вращения мишени при этом составляла 5000 об/с.

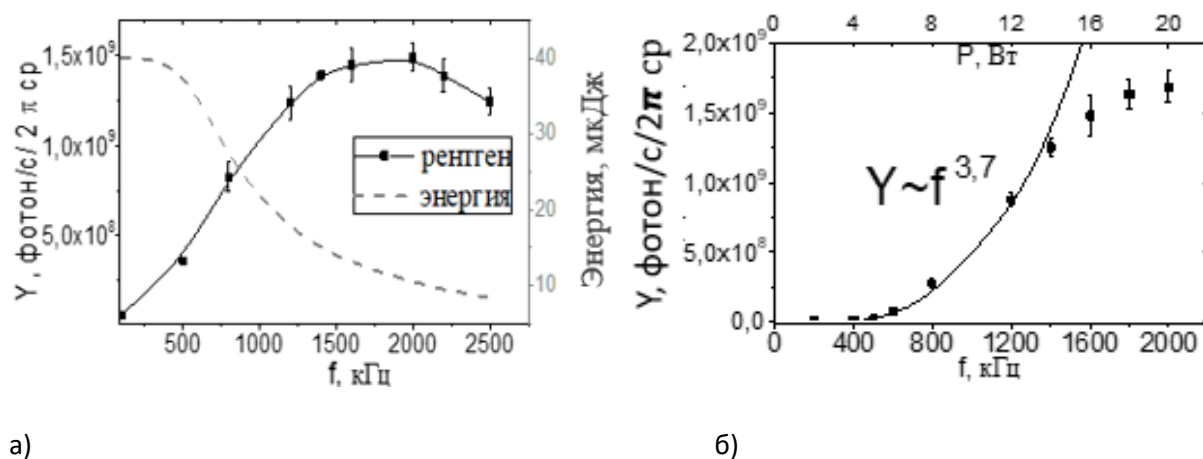
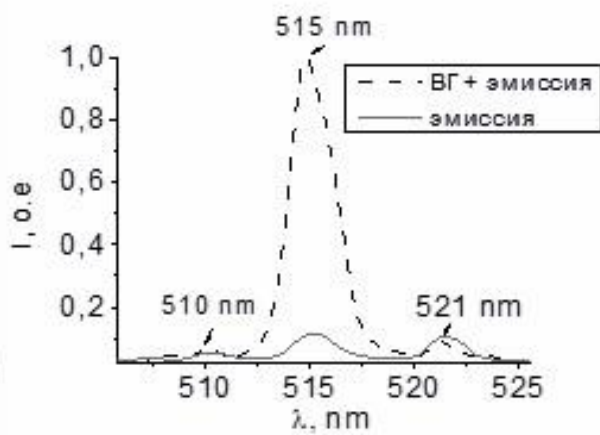


Рис.5. Поток рентгеновских фотонов в зависимости от частоты повторения лазерных импульсов при максимальной мощности для каждого частотного режима. Пунктирной линией обозначена энергия одиночного импульса в зависимости от частоты (а), Зависимость потока рентгеновских фотонов от частоты следования лазерных импульсов при фиксированной энергии 10 мкДж (б),

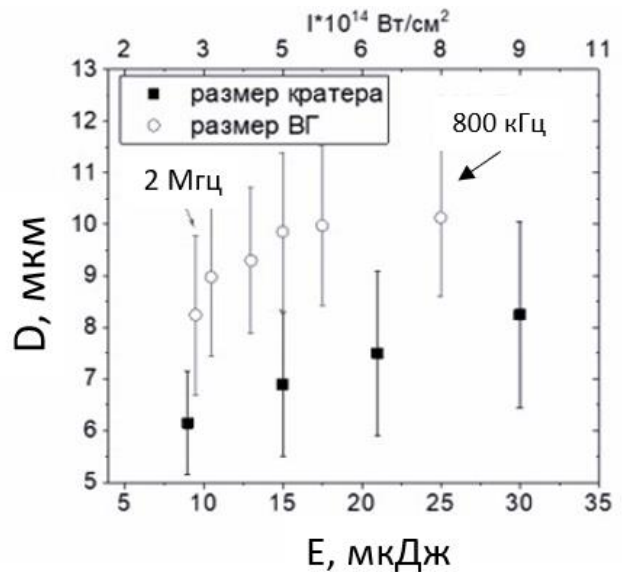
В эксперименте получено, что оптимальными условиями для получения максимального потока фотонов являются частота лазерных импульсов 2 МГц и энергия в импульсе 10 мкДж. Отметим, что выход рентгеновского излучения нелинейно зависит от частоты воздействия лазерных импульсов ($\gamma \sim f^{3,4}$) в диапазоне 200 кГц – 1,4 МГц (см. рис. 4 б). Затем кривая выходит на насыщение. Мы связываем данное нелинейное поведение с изменением пространственно-временного интервала между импульсами, взаимодействием с модифицированной поверхностью, и возможным увеличением локального поля при сокращении межкратерного расстояния. Насыщение же может быть связано с возможным накоплением аблированных микрочастиц в приповерхностной области, препятствующих доставке излучения до поверхности при частоте более 1,4 МГц. Максимальный поток рентгеновских фотонов составляет $(1,5 \pm 0,5) \cdot 10^9$ фот/с/2πср. Нами также был

измерен спектр рентгеновского излучения на расстоянии 20 см от источника и получено, что в спектре содержится около 25% характеристических фотонов, то есть поток $\text{Cu K}\alpha$ составляет $\sim 4 \cdot 10^8$ фот/с/2 π ср, что является сопоставимым с лазерно-плазменными рентгеновскими источниками, создаваемыми используя милиджоульные лазерные системы [32][28][3].

В Параграфе 4.3. описывается методика измерения размера микроплазменной области, ответственной за генерацию рентгеновского излучения, используя данные размера второй оптической гармоники из лазерной микроплазмы (ее спектр представлен на рис.6 а). Для измерения размера был собран оптический микроскоп, переносящий увеличенное изображение второй гармоники на ПЗС матрицу. Было установлено, что размер второй гармоники слабо зависит от частоты и составляет $8,5 \pm 1,6$ мкм при параметрах, соответствующих максимуму выхода рентгеновского излучения (2 МГц, 10 мкДж). Было проведено сопоставление размера второй гармоники с одиночными кратерами в сапфире, и показано, что размер второй гармоники превосходит размер кратера примерно в 1.5 раза. Различие в размерах объясняется нами наличием двухкомпонентной среды перед мишенью, модифицирующей размер лазерного пучка, и как следствие размер второй гармоники при большой частоте. В то время как на размер кратера влияет только дефокусировка в воздушной среде.



а)



б)

Рис.6. Эмиссионный спектр и второй гармоники и эмиссии в режиме 2 мГц, 10 мкДж (а), зависимость лазерно-плазменного диаметра пучка второй гармоники (ВГ) (круглые точки) и кратера, созданного на поверхности кристаллической пластинки сапфира (квадратные точки) при различных значениях энергии лазерного импульса и средней мощности 20Вт (б)

В параграфе 4.4 обсуждаются первые демонстрационные абсорбционные и фазово-контрастные измерения тестовых объектов с помощью полученного источника.

Основные результаты диссертации

1. Установлено, что при импульсно-периодическом воздействии фемтосекундных лазерных импульсов (с интенсивностью порядка 10^{14} Вт/см² и более) на твердотельную мишень в режиме формирования макроканала, динамика амплитуды возникающего в микроплазме рентгеновского излучения связана с изменением лазерной интенсивности и может быть использована для мониторинга ее изменения по мере формирования канала.
2. Впервые определена величина интенсивности фемтосекундного лазерного монофиламента, сформированного чирпированными импульсами, воздействующего на находящуюся в воздухе твердотельную мишень в режиме формирования микроканала с использованием лазерно-инициированного сигнала рентгеновского излучения; величина интенсивности составила $I \sim 2 \cdot 10^{14}$ Вт/см² при следующих параметрах ($\lambda = 0,8$ мкм, $E = 6$ мДж, $NA = 0,008$, $P \sim (3-5) \cdot P_{кр}$, $\tau = 500$ фс).
3. Показано, что при воздействии импульсно-периодического сфокусированного фемтосекундного излучения Cr:forsterite лазера ($\lambda = 1240$ нм, $E \sim 700$ мкДж, $f = 10$ Гц, $\tau = 200$ фс, $NA = 0,07 - 0,1$) на поверхность многослойной структуры в режиме создания микроканала, материал слоев которой имеет различающиеся атомные номера Z , возникающее в микроплазме рентгеновское излучение может быть использовано для диагностики послойного процесса абляции мишени.
4. Обнаружено, что воздействие сфокусированного фемтосекундного излучения Cr-forsterite лазера ($\lambda = 1240$ нм) с вакуумной интенсивностью порядка 10^{14} Вт/см² – 10^{15} Вт/см² на структурированную пленку, содержащую наностержни оксида железа, сопровождается возникновением зависящего от ориентации линейной поляризации выхода интегрального и характеристического (6.4 кэВ) рентгеновского излучения.
5. Выявлено влияние длительности лазерных импульсов на выход рентгеновского излучения при воздействии сфокусированного фемосекундного лазерного пучка на твердотельную мишень в газовой среде (воздух, гелиевый поддув). Установлено, что при воздействии сфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов ($\lambda = 0,8$ мкм, $E = 6$ мДж, $NA = 0.1$) на медную мишень в режиме гелиевого поддува в зону воздействия, при увеличении длительности импульса с 30 фс до 300 фс, выход рентгеновского излучения возрастает в 10 раз и достигает $2 \cdot 10^7$ фот/импульс/2πср (или $2 \cdot 10^8$ фот/с/2πср), что является максимальным

для вневакуумных условий и отвечает необходимым условиям проведения время-разрешенных дифракционных экспериментов.

6. Создан микрофокусный лазерно-плазменный рентгеновский источник, функционирующий на базе низкоэнергетического волоконного итербиевого фемтосекундного лазера (длительность импульса 280 фс, частота лазерных импульсов 2 МГц, средняя мощность 20 Вт, энергия в импульсе 10 мкДж) с выходом рентгеновского излучения $(1,5 \pm 0,5) \cdot 10^9$ фот/с в 2 π.
7. Разработана методика мониторинга в режиме реального времени размера микроплазмы, создаваемой на поверхности мишени остросфокусированным ($NA = 0.2$) пучком импульсно-периодического (частота генерации 800 кГц – 2 МГц) фемтосекундного (280 фс) волоконного лазера с энергией одиночного импульса в диапазоне 10 – 25 мкДж, используя сигнал второй гармоники из микроплазмы. Установлено, используя данную методику, что размер лазерно-плазменной области, отвечающей максимальному потоку рентгеновских фотонов, составляет $8,5 \pm 1,6$ мкм.

Список публикаций по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, РИНЦ, а также перечне изданий МГУ (с указанием личного вклада в процентах)

1. Zhvaniya, I. A., **Garmatina, A. A.**, Makarov, I. A., and Gordienko, V. M. Tracking of buried layers during plasma-assisted femtosecond laser drilling of compound targets. // *Journal of Applied Physics*, 2016. Vol 120, № 4, P. 045901, 7 pp. WoS JIF 2,7/ 0,8 п.л. / авторский вклад 60%
2. **Гарматина, А. А.**, Жвания, И. А., Потёмкин, Ф. В. и Гордиенко, В. М. Генерация рентгеновского излучения из плазмы в микроканале медной мишени, находящейся в воздухе, под действием мягкосфокусированных фемтосекундных лазерных импульсов с интенсивностью 100 ТВт/см². // *Квантовая электроника*, 2018, Т.48, № 7, С. 648-652. ИФ (РИНЦ) 0,8 / 0, 57 п.л. / авторский вклад 60%
Переводная версия
Garmatina, A. A., Zhvaniya, I. A., Potemkin, F. V., and Gordienko, V. M. Generation of x-ray radiation from a plasma in a microchannel of a copper target located in the air under the action of soft-focused femtosecond laser pulses with an intensity of 100 TW cm⁻². // *Quantum Electronics*, 2018, Vol 48, № 7, P. 648-652. WoS JIF = 1,022
3. **Garmatina, A. A.**, Nazarov, M. M., Zhvaniya, I. A., Gordienko, V. M., and Panchenko, V. Y., Laser chirp effect on x-ray enhancement under interaction of monofilament with solids placed in air. // *Laser Physics Letters*, 2019 Vol. 16 № 2, 025401, 6 pp. WoS JIF = 2,015/ 0,7 п.л. / авторский вклад 50%
4. **Garmatina, A. A.**, Bravy, B. G., Potemkin, F. V., Nazarov, M. M., and Gordienko, V. M. (). Intensity clamping and controlled efficiency of X-ray generation under femtosecond laser interaction with nanostructured target in air and helium. // *Journal of*

- Physics: Conference Series*, 2020, Vol 1692 № 1, P. 012004, 7 pp. IOP Publishing. Scopus JIF = 0,48/ 0,8 п.л./ авторский вклад 40%
5. **Garmatina, A. A.**, Shubnyi, A. G., Asadchikov, V. E., Nuzdin, A. D., Baranov, A. I., Myasnikov, D. V., Minaev N. V .and Gordienko, V. M. X-ray generation under interaction of a femtosecond fiber laser with a target and a prospective for laser-plasma X-ray microscopy. // *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol. 2036, № 1, P. 012037, 6 pp. IOP Publishing. Scopus JIF = 0,48/ 0,7 п.л./авторский вклад 50%
 6. **Гарматина, А. А.**, Назаров, М. М., Щеглов, П. А., Чашин, М. В., Алешкевич, В.А., Бравый, Б.Г., Гордиенко В.М, Панченко, В.Я. Эффективная генерация характеристического рентгеновского излучения при воздействии chirпированных фемтосекундных лазерных импульсов на медную мишень при локальном поддуве гелия. // *Оптика и спектроскопия*, 2022, Т. 130, № 4, С. 522-529. ИФ (РИНЦ) = 0,636/ 0,9 п.л./ авторский вклад 40%
Переводная версия
Garmatina, A. A., Nazarov, M. M., Shcheglov, P. A., Chaschin, M. V., Aleshkevich, V. A., Bravy, B. G., Gorgienko V.M. and Panchenko, V. Y. Effective line X-ray generation by chirped femtosecond laser pulses interaction with copper target at local helium flow. // *Optics and Spectroscopy*, 2023, Vol 131, № 6, P. 373 - 379. Scopus JIF = 0,839
 7. **Гарматина А. А.**, Асадчиков В. Е, Бузмаков, А. В., Дьячкова, И. Г., Дымшиц, Ю. М., Баранов, А.И., Мясников, Д. В., Минаев, Н.В., Гордиенко, В.М. Микрофокусный источник характеристического рентгеновского излучения для фазово-контрастной визуализации на основе фемтосекундного волоконного лазера. // *Кристаллография*, 2022, Т.67, №6, С. 992 - 1000, ИФ (РИНЦ) = 0,784 / 1 п.л. / авторский вклад 40%
Переводная версия
Garmatina, A. A., Asadchikov, V. E., Buzmakov, A. V., Dyachkova, I. G., Dymshits, Y. M., Baranov, A. I., Myasnikov D.N., Minaev N.V. and Gordienko, V. M. Microfocus source of characteristic X-rays for phase-contrast imaging based on a femtosecond fiber laser. // *Crystallography Reports*, 2022, Vol. 67, № 6, P.1026-1033. WoS JIF = 0,735
 8. **Garmatina, A.**, Mareev, E., Minaev, N., Asharchuk, N., Semenov, T., Mozhaeva, M., Korshunov A, Krivonosov Y., Dyachkova I., Buzmakov A., Koldaev V., Zolotov D., Dymshits Y., Gordienko V. and Asadchikov V. Vacuum-free femtosecond fiber laser microplasma X-ray source for radiography. // *Optics Express*, 2023, Vol. 31 № 26, P. 44259-44272. WoS JIF = 3,894/ 1,6 п.л./ авторский вклад 30%
 9. **Гарматина, А.А.**, Мареев Е.И., Коршунов А.А., Можаяева М. Д., Минаев Н.В., Муслимов А.Э., Хмеленин Д.Н, Асадчиков В.Е., Гордиенко В.М. Микроскопия второй гармоники из приповерхностной плазмы, зажигаемой остросфокусированным пучком фемтосекундного волоконного лазера. // *Оптика*

и спектроскопия, 2024, Т. 132, № 1, С. 34 - 41. ИФ (РИНЦ) = 0,636 / 0,924 п.л./ авторский вклад 40%

Переводная версия

Garmatina A.A. , Mareev E.I, Korshunov A.A. , Mozhaeva M.D. , Minaev N.V. , Muslimov A. E. , Hmelenin D.N., Asadchikov V.E. , Gordienko V.M. Second harmonic microscopy from nearsurface plasma ignited by tightly focused femtosecond fiber laser beam. // *Optic and Spectroscopy*, 2024, Vol.132, № 1, P. 32-38. Scopus JIF = 0,839

Другие издания

10. **Garmatina, A. A.**, Nazarov, M. M., Zhvaniya, I. A., Gordienko, V. M., and Panchenko, V. Y. (2018, June). Femtosecond filament induced x-rays under solids micromachining in air: evaluation of filament peak intensity. In *2018 International Conference Laser Optics (ICLO)* (pp. 262-262). IEEE.
11. **Garmatina, A. A.**, Asadchikov, V. E., Buzmakov, A. V., Dyachkova, I. G., Baranov, A. I., Myasnikov, D. V., N. V. Minaev and Gordienko, V. M. (2022, June). Femtosecond high repetition rate fiber laser-driven plasma microfocus X-ray source for imaging applications. In *2022 International Conference Laser Optics (ICLO)* (pp. 1-1). IEEE.
12. **Гарматина, А. А.**, Коршунов, А. А., Можаяева, М. Д., Асадчиков, В. Е., Бузмаков, А. В., Дьячкова, И. Г., Дымшиц Ю.М., Баранов А.И., Мясников Д.В., Минаев Н.В. и Гордиенко, В. М. Микрофокусный источник характеристического рентгеновского излучения на основе фемтосекундного волоконного лазера для радиографии. // *Успехи в химии и химической технологии*, 2022, Т. 36, № 7 (256), С. 43-45

Список использованных источников

1. Hussain Shah S.K., Iqbal J., Ahmad P., Khandaker M.U., Haq S., Naeem M. Laser induced breakdown spectroscopy methods and applications: A comprehensive review // *Radiat. Phys. Chem.* - 2020. - Vol. 170. - P. 108666.
2. Gorlova D., Tsymbalov I., Volkov R., Savel'ev A. Transition radiation in the THz range generated in the relativistic laser—tape target interaction // *Laser Phys. Lett.* - 2022. - Vol. 19 - № 7. - P. 075401.
3. Martín L., Benlliure J., Cortina-Gil D., Haruna A., Ruiz C. Validation of a laser driven plasma X-ray microfocus source for high resolution radiography imaging // *Phys. Medica.* - 2021. - Vol. 82. - P. 163–170.
4. Förster D.J., Jäggi B., Michalowski A., Neuenschwander B. Review on experimental and theoretical investigations of ultra-short pulsed laser ablation of metals with burst pulses // *Materials (Basel)*. - 2021. - Vol. 14 - № 12. - P. 3331.
5. Ji L., Zhang L., Cao L., Zheng J., Wang J., Han W., Zhang H. Laser rapid drilling of bone tissue in minimizing thermal injury and debris towards orthopedic surgery // *Mater. Des.* - 2022. - Vol. 220. - P. 110895.
6. Wang H.J., Yang T. A review on laser drilling and cutting of silicon // *J. Eur. Ceram. Soc.* - 2021. - Vol. 41 - № 10. - P. 4997–5015.
7. Wang R., Dong X., Wang K., Sun X., Fan Z., Duan W. Investigation on millijoule femtosecond laser spiral drilling of micro-deep holes in thermal barrier coated

- alloys // Int. J. Adv. Manuf. Technol. - 2021. - Vol. 114 - № 3–4. - P. 857–869.
8. Jeong D.C., Tsai P.S., Kleinfeld D. Prospect for feedback guided surgery with ultra-short pulsed laser light // Curr. Opin. Neurobiol. - 2012. - Vol. 22 - № 1. - P. 24–33.
9. Banerjee S.P., Chen Z., Utkin I., Fedosejevs R. Detection of buried layers in silicon devices using LIBS during hole drilling with femtosecond laser pulses // Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. - 2013. - Vol. 111 - № 3. - P. 791–798.
10. Климентов С.М., Пивоваров П.А., Конов В.И., Брайтлинг Д., Даусингер Ф. Лазерная микрообработка в газовой среде при высокой частоте повторения аблирующих импульсов // Квантовая электроника. - 2004. - Vol. 34 - № 6. - P. 537–540.
11. Sun J., Longtin J.P. Inert gas beam delivery for ultrafast laser micromachining at ambient pressure // J. Appl. Phys. - 2001. - Vol. 89 - № 12. - P. 8219–8224.
12. Kiselev D., Woeste L., Wolf J.P. Filament-induced laser machining (FILM) // Appl. Phys. B Lasers Opt. - 2010. - Vol. 100 - № 3. - P. 515–520.
13. Gordon D.F., Ting A.C., Alexeev I., Fischer R.P., Sprangle P. Direct measurements of the dynamics of self-guided femtosecond laser filaments in air // IEEE Trans. Plasma Sci. - 2006. - Vol. 34 - № 2. - P. 249–253.
14. Park J., Lee J., Nam C.H. Laser chirp effect on femtosecond laser filamentation generated for pulse compression // Opt. Express. - 2008. - Vol. 16 - № 7. - P. 4465.
15. Thogersen J., Borowiec A., Haugen H.K., McNeill F.E., Stronach I.M. X-ray emission from femtosecond laser micromachining // Conf. Lasers Electro-Optics (CLEO 2000). Tech. Dig. Postconf. Ed. TOPS Vol.39 (IEEE Cat. No.00CH37088). - 2000. - Vol. 363. - P. 361–363.
16. Reich C., Gibbon P., Uschmann I., Forster E. Yield optimization and time structure of femtosecond laser plasma $K\alpha$ sources // Phys. Rev. Lett. - 2000. - Vol. 84 - № 21. - P. 4846–4849.
17. Gibbon P., Förster E. Short-pulse laser - plasma interactions // Plasma Phys. Control. Fusion. - 1996. - Vol. 38 - № 6. - P. 769–793.
18. Фетисов Г.В. Рентгеновские дифракционные методы структурной диагностики материалов: прогресс и достижения // Успехи физических наук. - 2020. - Vol. 190 - № 1. - P. 2–36.
19. Ахманов С.А., Баянов И.М., Гордиенко В.М., Джиджоев М.С., Краюшкин С.В., Магницкий С.А., Платоненко В.Т., Пономарев Ю.В., Савел А.Б., Слободчиков Е.В., Тарасевич А.П. Генерация пикосекундных рентгеновских импульсов в плотной плазме, создаваемой мощными фемтосекундными лазерными импульсами с длиной волны 308 нм // Квантовая электроника. - 1991. - Vol. 18 - № 3. - P. 278–279.
20. Ivanov K.A., Gavrilin I.M., Volkov R. V., Gavrilov S.A., Savel'Ev A.B. Thicket high Z wavelength-scale structured target: advantages and limitations for laser-driven hard x-ray source and phase contrast imaging // Laser Phys. Lett. - 2021. - Vol. 18 - № 7. - P. 075401.
21. Gambari M., Clady R., Videau L., Utéza O., Ferré A., Sentis M. Experimental investigation of size broadening of a $K\alpha$ x-ray source produced by high intensity laser pulses // Sci. Rep. - 2021. - Vol. 11 - № 1. - P. 23318.
22. Hada M., Matsuo J. Effects of ambient pressure on Cu $K\alpha$ X-ray radiation with millijoule and high-repetition-rate femtosecond laser // Appl. Phys. B Lasers Opt. - 2010. - Vol. 99 - № 1–2. - P. 173–179.

23. Букин В.В., Гарнов С.В., Малютин А.А., Стрелков В.В. Фемтосекундная лазерная микроплазма оптического пробоя газов: динамика процессов ионизации и постиионизации // Квантовая электроника. - 2007. - Vol. 37 - № 10. - P. 961–966.
24. Boschetto D., Mourou G., Rousse A., Mordovanakis A., Hou B., Nees J., Kumah D., Clarke R. Spatial coherence properties of a compact and ultrafast laser-produced plasma keV x-ray source // Appl. Phys. Lett. - 2007. - Vol. 90 - № 1. - P. 011106.
25. Петраков А.П. Рентгеновский метод фазового контраста и демонстрация применения его для исследования кровеносных сосудов на модельном объекте // Журнал Технической Физики. - 2003. - Vol. 73 - № 5. - P. 84–89.
26. Bessonov V.B. Microfocus X-ray Tubes // J. Russ. Univ. Radioelectron. - 2021. - Vol. 24 - № 5. - P. 6–21.
27. Трубки для структурного анализа с анодом «прострельного» типа фирмы “Светлана рентген” [Electronic resource]. URL: <http://www.svetlana-x-ray.ru/production-list.html?cid=11>.
28. Chakera J.A., Ali A., Tsui Y.Y., Fedosejevs R. A continuous kilohertz Cu K α source produced by submillijoule femtosecond laser pulses for phase contrast imaging // Appl. Phys. Lett. - 2008. - Vol. 93 - № 26. - P. 261501.
29. Волоконные фемтосекундные лазеры фирмы “Авеста” [Electronic resource]. URL: <http://avesta.ru/products/lasers/femtosekundnie-volokonnie-laseri/>.
30. Kirsch D.C., Chen S., Sidharthan R., Chen Y., Yoo S., Chernysheva M. Short-wave IR ultrafast fiber laser systems: Current challenges and prospective applications // J. Appl. Phys. - 2020. - Vol. 128 - № 18. - P. 180906.
31. Варанавичус А., Власов Т.В., Волков Р.В., Гаврилов С.А., Гордиенко В.М., Дубетис А., Жеромскис Е., Пискарскас А., Савельев А.Б. Т.Г. Выход жесткого рентгеновского излучения из плотной плазмы как функция длины волны греющего сверхкороткого лазерного импульса // Квантовая электроника. - 2000. - Vol. 30 - № 6. - P. 523–528.
32. Baguckis A., Plukis A., Reklaitis J., Remeikis V., Giniūnas L., Vengris M. Generation of plasma X-ray sources via high repetition rate femtosecond laser pulses // Appl. Phys. B. - 2017. - Vol. 123 - № 12. - P. 290.