

На правах рукописи

ЖВАНИЯ ИРИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ГЕНЕРАЦИЯ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И
ОПТИЧЕСКИХ ГАРМОНИК ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНОГО ЛАЗЕРНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ МИШЕНИ И
КЛАСТЕРНЫЕ ПУЧКИ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

МОСКВА – 2014

Работа выполнена на кафедре общей физики и волновых процессов физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Гордиенко Вячеслав Михайлович

Официальные оппоненты: **Гарнов Сергей Владимирович**
доктор физико-математических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН), зам. директора ИОФ РАН по научной работе, заведующий отделом колебаний.

Пикуз Сергей Алексеевич
кандидат физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Заведующий лабораторией диагностики вещества в экстремальном состоянии.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Защита состоится “23” октября 2014 года в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, д.1, стр.62, корпус нелинейной оптики, аудитория им. С.А. Ахманова.

С текстом диссертации можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский пр-т, д.27) и на сайте физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова <http://www.phys.msu.ru/rus/research/disser/sovet-D501-001-31/>

Автореферат разослан “ ____ ” августа 2014 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.31
кандидат физ.-мат. наук, доцент

А.А.Коновко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Появление фемтосекундных лазерных систем открыло широчайшие горизонты для фундаментальных исследований в области физики и химии, интерес к которым продолжает только возрастать. Выполненные работы привели в настоящее время и к развитию новых прикладных направлений, основанных на фемтотехнологиях: микрообработке материалов, прецизионной микрохирургии, биомедицине и др.

Использование импульсов фемтосекундной длительности (~ 100 фс) дало возможность генерировать сверхсильные световые поля в лабораторных условиях уже при миллиджоульных уровнях энергии и изучать экстремальные и сильно неравновесные состояния вещества. При воздействии фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью порядка 10^{16} Вт/см² на мишень, образуется высокотемпературная плазма, которая является источником высокоэнергетических заряженных частиц и сверхкоротких рентгеновских импульсов с энергиями квантов до десятка кэВ, эффективность генерации которых достигает величины порядка $\sim 10^{-6}$. Взаимодействие лазерного излучения с этой плазмой сопровождается также процессом генерации второй гармоники лазерного излучения (ГВГ) с эффективностью достигающей 10^{-4} . Рентгеновское излучение из фемтосекундной лазерной плазмы может быть использовано в рентгеноструктурном анализе с высоким временным разрешением для изучения динамики сверхбыстрых фазовых переходов и контроля состояния кристаллической решетки. Кроме этого, оно наряду со второй гармоникой (ВГ) может являться инструментом диагностики параметров самой лазерной плазмы и энерговклада излучения в мишень.

При импульсно-периодическом высокоинтенсивном лазерном воздействии в одну точку мишени, в результате процесса лазерной абляции, происходит вынос массы вещества мишени и образуется канал. При этом в процессе формирования канала, физическая картина сопутствующих процессов резко усложняется по сравнению с ситуацией, когда лазерное излучение падает на гладкую поверхность мишени. Концентрация лазерного излучения в канале и возможное увеличение локального поля на неровностях дна ведут к возрастанию поглощения энергии импульса, и, соответственно, к повышению температуры плазмы внутри канала и росту эффективности генерации рентгеновского излучения. С другой стороны, внутри канала может нарабатываться взвесь - «облако», содержащее нано- и микрочастицы мишени (кластеры). Взаимодействие лазерного излучения с таким облаком в режиме плазмообразования будет приводить к развитию процесса самовоздействия (самодефокусировка, фазовая самомодуляция и др.), частичной экранировке и проблемам доставки энергии излучения на дно канала и, как следствие, изменению формы канала. Способом мониторинга наличия такой взвеси в режиме реального времени, может являться анализ модификаций спектра лазерного излучения (или его второй гармоники), испытавшего в ней самовоздействие. Появление электронной компоненты в результате ионизации частиц взвеси будет приводить к сдвигу спектра лазерного излучения в коротковолновую область. Кроме того, модификация спектра лазерного излучения и его второй гармоники может возникать и в силу других физических механизмов, таких как, например, отражение излучения от расширяющегося придонного плазменного слоя (эффект Доплера) или в

результате взаимодействия излучения с ионно-акустическими волнами в плазме. Регистрация спектральных модификаций наряду с выходом рентгеновского излучения и сигналом второй гармоники излучения могут обеспечить комплексный подход к контролю взаимодействия лазерного излучения с мишенью в режиме образования канала и выявлению причин, влияющих на эффективность этих процессов. Изучение особенностей, возникающих при формировании каналов фемтосекундным лазерным излучением высокой интенсивности (порядка 10^{15} Вт/см² и более) является важным, например, для задач обработки высокопрочных материалов (получение «охлаждающих» отверстий в компонентах газотурбинных установок, элементного анализа).

Помимо проблемы наличия взвеси в канале твердотельной мишени и процессов нелинейного взаимодействия интенсивного лазерного излучения с ней, в настоящее время огромный интерес вызывают исследования нелинейных процессов, возникающих при воздействии фемтосекундного лазерного излучения на нанокластеры атомов или молекул.

Широко известен и исследован ставший уже классическим способ создания нанокластеров, основанный на конденсации газа при его сверхзвуковом расширении через импульсное сопло в вакуум. Обычно, в качестве такого газа выбираются инертные газы - Ar, Kr, Xe. Образованные таким образом кластеры являются уникальным физическим объектом в том числе и с точки зрения создания источника рентгеновского излучения при воздействии на них высокоинтенсивного ($I > 10^{15}$ Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения. Кластерная мишень объединяет в себе преимущества твердотельной и газообразной мишеней и может поглощать до 95% энергии взаимодействующего с ней лазерного излучения. Кластерная наноплазма является источником не только рентгеновского излучения, но и высокоэнергетических ионов, нейтронов и электронов. Она обладает ярко выраженными нелинейно-оптическими свойствами: распространение фемтосекундного лазерного излучения в ней сопровождается филаментацией, генерацией гармоник и излучения терагерцового диапазона. Яркое характеристическое рентгеновское излучение из кластерной наноплазмы может быть получено с эффективностью сопоставимой со случаем твердотельной мишени. В этой связи одной из наиболее актуальных проблем является повышение эффективности генерации рентгеновского излучения и расширение набора получаемых характеристических линий.

Очевидным способом повышения эффективности генерации характеристического рентгеновского излучения (кроме повышения интенсивности лазерного излучения) является использование крупных кластеров, содержащих более 10^6 частиц. Простейший способ увеличения размера кластеров - повышение давления рабочего газа в пределах 10-100 атм. Другим ключевым параметром, определяющим эффективность генерации рентгеновского излучения, является плотность электронов, возникших в результате начальной ионизации кластера лазерным импульсом. В наноплазме, образованной из кластеров многоатомных молекул, электронная плотность может быть выше по сравнению с кластерной наноплазмой на основе инертного газа. Кроме того, использование молекулярных газов выгодно и в плане расширения набора линий характеристического рентгеновского излучения. Эффективным способом создания крупных молекулярных кластеров является использование смеси, состоящей из легкокластеризующегося молекулярного газа и относительно легкого газаносителя в более высокой концентрации. Поэтому можно ожидать, что генерация характеристического жесткого рентгеновского излучения ($E > 2$ кэВ) будет происходить с

высокой эффективностью при использовании в качестве мишени крупных кластеров многоатомных молекул.

Использование смесей многоатомных молекул с инертными газами при определенных концентрациях может сопровождаться появлением смешанных кластеров, содержащих и атомы и молекулы. Такие кластеры представляют интерес не только в плане особенностей их строения, лазерной ионизации и дефрагментации, но и генерации наноплазмы и характеристического мультиэнергетического рентгеновского излучения. Можно ожидать, что при лазерном возбуждении таких кластеров, спектр рентгеновского излучения будет содержать характеристические линии всех компонентов, составляющих кластер. Представляет интерес и вопрос о возможности управления парциальной концентрацией компонентов, образующих смешанные кластеры, что даст возможность влиять и на выход характеристического излучения на соответствующих линиях.

Таким образом, тематика диссертационной работы представляется новой и востребованной с точки зрения фундаментальных исследований и практических применений.

Целями настоящей диссертационной работы являлось:

1. Изучение особенностей параметров второй гармоники лазерного излучения (спектральная модификация, эффективность генерации) и выхода рентгеновского излучения, возникающих при создании канала в твердотельной мишени последовательностью интенсивных ($I \approx 10^{15} - 10^{16}$ Вт/см²) фемтосекундных (~100 фс) лазерных импульсов.

2. Исследование возможности получения эффективной генерации жесткого характеристического рентгеновского излучения в диапазоне 2-5 кэВ при воздействии на молекулярные кластеры фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью $I \approx 10^{15} - 10^{16}$ Вт/см².

3. Детектирование смешанных атомарно-молекулярных кластеров по спектру рентгеновского излучения, возникающего при их возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами с интенсивностью $I \approx 10^{15} - 10^{16}$ Вт/см² и создание двухэнергетического источника рентгеновского излучения на основе смешанных кластеров.

Научная новизна

1. Обнаружено, что при формировании канала в мишени последовательностью сфокусированных ($f=6$ см) на ее поверхность фемтосекундных (~100 фс) лазерных импульсов с интенсивностью $I \approx 10^{16}$ Вт/см², выход рентгеновского излучения и сигнал второй гармоники излучения немонотонны и достигают максимума. Эффективность генерации рентгеновского излучения возрастает с $1 \cdot 10^{-6}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ при формировании канала в мишени из плавленого кварца, находящейся в вакууме и фокусировке лазерного излучения на поверхность мишени. В случае, если мишень находится в воздухе, эффективность генерации рентгеновского излучения при тех же условиях возрастает с $4 \cdot 10^{-8}$ до $4 \cdot 10^{-7}$. Установлено, что при формировании канала, эффективность процесса ГВГ достигает величины $4 \cdot 10^{-3}$, а сдвиг спектра второй гармоники в голубую область составляет в среднем величину 25 нм. Впервые исследована зависимость сдвига спектра основного лазерного излучения и его второй гармоники от номера лазерного импульса, воздействующего на мишень (алюминий, кварц), находящуюся в вакууме или воздухе.

2. С помощью метода рэлеевского рассеяния установлено, что при использовании смеси тяжелого молекулярного газа с относительно легким газом-носителем в большой пропорции ($\text{SF}_6\text{-Ar}$ 1:8, $\text{CF}_3\text{I-Ar}$ 1:30, изменение давления смеси в диапазоне 10-50 атм), генерируются крупные молекулярные кластеры. Впервые зарегистрировано характеристическое рентгеновское излучение (энергии линий: $E_S(K_\alpha)\approx 2,3$ кэВ, $E_{Cl}(K_\alpha)\approx 2,6$ кэВ, $E_{Cl}(K_\beta)\approx 2,8$ кэВ и $E_I(L_\alpha)\approx 4$ кэВ, $E_I(L_\beta)\approx 4,2$ кэВ) при фемтосекундном лазерном ($I\approx 6\cdot 10^{15}$ Вт/см²) возбуждении кластеров SF_6 , CF_3I и CF_2Cl_2 , образующихся при расширении в вакуум смесей молекул с аргоном (концентрации 1:8, 1:15 и 1:9). Получено, что при воздействии на кластеры молекул CF_2Cl_2 и SF_6 (смеси $\text{CF}_2\text{Cl}_2\text{-He}$ (1:9), $\text{SF}_6\text{-He}$ (1:8), давление 30 атм) фемтосекундными импульсами интенсивностью $I\approx 8\cdot 10^{15}$ Вт/см² ($E\approx 5$ мДж), эффективность генерации рентгеновского излучения достигает соответственно $2\cdot 10^{-5}$ и $1\cdot 10^{-5}$ при выходе квантов $3\cdot 10^8$ и $2\cdot 10^8$ фотон/имп.

3. Впервые исследована зависимость сигнала третьей гармоники и изображение свечения плазменного филамента, возникающих при взаимодействии интенсивного лазерного излучения (наносекундный контраст $K_{ns}\approx 10^5$, пикосекундный $K_{ps}\approx 2\cdot 10^2$) с кластерной струей, от положения перетяжки лазерного излучения относительно оси кластерного пучка. Установлено, что при максимальном выходе рентгеновского излучения, когда перетяжка лазерного излучения находится перед осью газокластерной струи, филамент имеет многофокусную структуру, а сигнал третьей гармоники испытывает минимум. При изменении (улучшении) контраста лазерного излучения ($K_{ns}\approx 5\cdot 10^6$, $K_{ps}\approx 10^6$), филамент в оптимальном режиме становится однофокусным.

4. Продемонстрировано, что спектр характеристического рентгеновского излучения может лежать в основе метода детектирования смешанных кластеров. Предложено для управления парциальной концентрацией компонентов, образующих смешанные кластеры, добавлять к используемой смеси третий компонент – легкий газ. На примере смеси газов фреона, аргона и гелия ($\text{CF}_2\text{Cl}_2\text{-Ar-He}$) впервые показана возможность управления выходом характеристического излучения на линиях кластерообразующих компонентов (аргона и хлора) за счет влияния гелия.

Научная и практическая значимость

Обнаруженные существенные сдвиги спектра второй гармоники лазерного излучения (достигающие 25 нм) могут служить в качестве индикатора наличия среды (взвеси, газа) внутри канала, формируемого в мишени интенсивным ($I>10^{15}$ Вт/см²) фемтосекундным лазерным излучением. Появление взвеси внутри канала может существенно влиять на скорость абляции вещества мишени.

Предложенный способ повышения эффективности генерации характеристического рентгеновского излучения и увеличения количества характеристических рентгеновских линий, основанный на использовании крупных кластеров из многоатомных молекул, позволяет расширить возможности источников сверхкоротких рентгеновских импульсов. Достижение минимума сигнала третьей гармоники при одновременном образовании плазменного филамента, наряду с выходом рентгеновского излучения, может использоваться в качестве критерия при проведении оптимизации положения перетяжки лазерного пучка относительно оси газокластерной струи. Зарегистрированное «выедание» спектра лазерного

излучения является еще одним критерием, который может быть использован при оптимизации энерговклада лазерного излучения в кластерную среду.

Спектр рентгеновского излучения является информационным каналом, позволяющим детектировать существование смешанных кластеров. Полученный на их основе источник двух синхронизованных характеристических рентгеновских линий может быть использован в экспериментах по дифференциальному поглощению.

Защищаемые положения

1. Процесс образования микроканала в результате абляции твердотельной мишени под действием импульсно-периодического сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения ($I \approx 10^{16}$ Вт/см²) сопровождается немонотонными выходами его второй гармоники и рентгеновского излучения, достигающими максимума. Максимальные эффективности генерации рентгеновского излучения и второй гармоники составляют, соответственно, $6 \cdot 10^{-6}$ и $4 \cdot 10^{-3}$ для мишени из плавленого кварца, находящейся в вакууме (остаточное давление 10^{-2} Торр). Спектр второй гармоники, возникающей в канале мишени, находящейся и в вакууме и в воздухе, испытывает значительный голубой сдвиг, достигающий величины 25 нм.

2. Использование кластеров многоатомных молекул (SF_6 , CF_2Cl_2), образующихся в 10% смеси молекулярного газа с газом-носителем гелием (давление смеси 30 атм), позволяет достичь выхода характеристических рентгеновских квантов в области 3 кэВ порядка 10^8 фотонов за лазерный импульс (с эффективностью преобразования энергии $\sim 10^{-5}$), при воздействии на газокластерную среду лазерным излучением с интенсивностью $I \approx 8 \cdot 10^{15}$ Вт/см² и энергией $E \approx 5$ мДж.

3. При расширении в вакуум 3% смеси фреона CF_2Cl_2 с аргоном (давление 25 атм), формируются смешанные атомарно-молекулярные кластеры. В результате воздействия на них интенсивного ($I \approx 8 \cdot 10^{15}$ Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения наряду с характеристическими рентгеновскими линиями хлора ($E_{\text{Cl}}(K_\alpha) \approx 2,6$ кэВ) генерируются также и характеристические линии аргона ($E_{\text{Ar}}(K_\alpha) \approx 3$ кэВ). Добавление к смеси гелия позволяет управлять относительными амплитудами этих характеристических рентгеновских линий.

Апробация работы и публикации

Основные результаты исследований, представленных в диссертации, докладывались на следующих научных конференциях: «International Conference “Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies» (FLAMN-07), 25- 28 June 2007, St. Petersburg, Russia; International Conference Advanced Laser Technologies (ALT-08), 13-18 September 2008, Siófok, Hungary; Пятая Международная Конференция «Фундаментальные проблемы оптики» (ФПО – 2008) 20-24 октября 2008 г., Санкт – Петербург, Россия; Молодежная школа-семинар Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства, 1-4 октября 2008г., Владимир, Россия; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2009", 13 -18 апреля 2009 года, Москва, Россия; Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2009", 12-15 апреля 2010 года, Москва, Россия; ICONO/LAT 2010 Int'l Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO

2010), August 23-26, 2010, Kazan, Russia; 19th International Conference on Advanced Laser Technologies – ALT'11, 03-08 September 2011, Golden Sands, Bulgaria; 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications" Scientific school "Nonlinear optics and terahertz radiation" (TERA-2012), June 20 – 21 2012, Moscow, Russia; International conference Laser Optics 2012, 25-29 June 2012, St. Petersburg, Russia; The International Conference on Coherent and Nonlinear Optics / The Lasers, Applications, and Technologies (ICONO/LAT13), Moscow, 18-22 June 2013, Russia; Advanced Laser Technologies (ALT'13), 16-20 September 2013, Budva, Montenegro.

Личный вклад автора

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, а также их интерпретация.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, благодарностей и списка цитированной литературы. Работа изложена на 140 страницах, включает 52 рисунка, 4 таблицы и список литературы с общим числом ссылок 224.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во *Введении* обсуждается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, защищаемые положения, определяется научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также приводится краткое содержание диссертационной работы.

В *первой главе* диссертации приведен обзор литературы по теме диссертационной работы. Первая глава состоит из двух основных логических частей – параграфов.

В *параграфе 1.1* описывается взаимодействие интенсивного ($I \sim 10^{15} - 10^{16}$ Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения с твердотельными мишенями в режиме плазмообразования. Описываются механизмы ионизации, поглощения лазерной энергии, а также процессы, сопутствующие образованию высокотемпературной плазмы - генерации рентгеновского излучения и второй гармоники лазерного излучения. Особое внимание уделяется специфике этих процессов при периодическом воздействии лазерного излучения в одну область мишени, когда в результате абляции в мишени формируется глубокий микроканал. При определенных параметрах в таком микроканале может образовываться наработанная взвесь частиц, которые в свою очередь тоже начинают взаимодействовать с лазерным излучением, оказывая влияние на эффективность энерговклада в мишень. Рассматриваются способы контроля взаимодействия лазерного излучения с мишенью, основанные на анализе рентгеновского сигнала, а также сигнала второй гармоники.

Предлагается по спектру второй гармоники определять наличие взвеси частиц внутри канала.

Параграф 1.2 посвящен взаимодействию интенсивного ($I \sim 10^{15} - 10^{16}$ Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения с кластерами - наночастицами, состоящими из атомов или молекул, удерживаемыми ван-дер-ваальсовыми силами. Освещается вопрос хаарактеризации кластеров, образующихся при сверхзвуковом истечении газа в вакуум. Описываются механизмы ионизации, нагрева и расширения кластеров в поле интенсивных лазерных импульсов; рассматриваются особенности, сопутствующие образованию лазерной наноплазмы - генерация рентгеновского излучения, нелинейные эффекты (генерация третьей гармоники лазерного излучения, его филаментация). Заостряется внимание на различных способах повышения эффективности генерации рентгеновского излучения - как с точки зрения варьирования параметров воздействующего лазерного излучения, так и путем варьирования параметров кластеров. Формулируются основные критерии для достижения наиболее эффективного преобразования лазерной энергии в рентгеновские кванты в диапазоне энергии 2-5 кэВ: предлагается использование крупных кластеров многоатомных молекул. Затрагивается вопрос о формировании смешанных кластеров, состоящих из различных атомов/молекул и возможности их диагностики по спектру рентгеновского излучения.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию выхода рентгеновского излучения, сигнала ВГ лазерного излучения и его спектральных модификаций, возникающих при формировании глубокого микроканала в твердотельной мишени фемтосекундным излучением лазера на хром-форстерите с интенсивностью $I \approx 10^{16}$ Вт/см².

В *параграфе 2.1* описывается схема экспериментальной установки для исследования выхода жесткого рентгеновского излучения, отраженного лазерного излучения и его второй гармоники, генерируемых при воздействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения как на поверхность мишени, так и в случае формирования в ней канала. Приводятся спектры рентгеновского излучения, зарегистрированные при формировании канала в различных твердотельных мишенях (CaF₂, KCl, Cu).

В *параграфе 2.2* приводятся результаты экспериментов по выходу жесткого рентгеновского излучения и динамике сигнала второй гармоники при формировании канала в мишени (т.е. в зависимости от номера лазерного импульса) и демонстрируется, что оба сигнала немонотонны в зависимости от номера воздействующего лазерного импульса и имеют максимум (рис. 1). Приводятся сравнительные значения эффективностей генерации рентгеновского излучения и второй гармоники лазерного излучения для мишени из

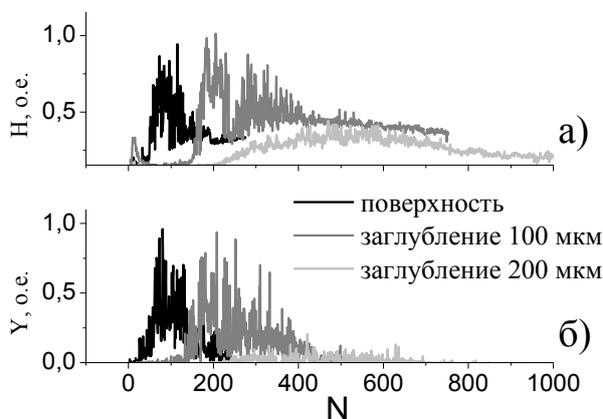


Рис. 1. Сигнал ВГ (H) а) и выход рентгеновского излучения (Y) б) при формировании канала в мишени из плавленого кварца, находящейся в вакууме, в зависимости от номера воздействующего лазерного импульса для различных фокусировок лазерного излучения.

плавленого кварца, которые возросли, соответственно, с $1 \cdot 10^{-7}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ и с $5 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ при формировании канала.

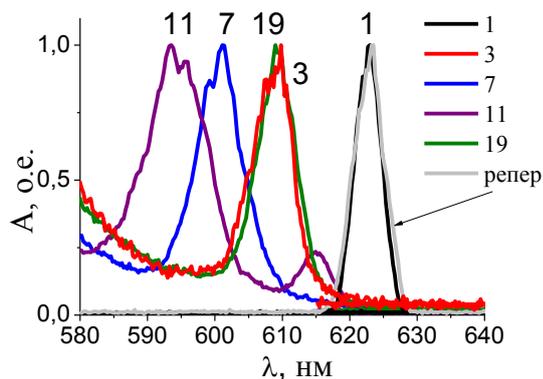


Рис. 2. Спектр ВГ из канала алюминиевой мишени, находящейся в вакууме. Цифрой указан номер лазерного импульса, которому соответствует спектр.

В параграфе 2.3 обсуждаются спектральные особенности второй гармоники лазерного излучения, отраженной из канала (рис 2). Приводятся сравнительные данные для сдвига спектра ВГ и основного излучения, зарегистрированные по мере формирования канала в алюминиевой и кварцевой мишенях, находящихся как в вакууме, так и в воздухе. Оценка электронной плотности плазмы взвеси внутри канала, сделанная на основе величины сдвигов спектра ВГ, оказывается порядка $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

В параграфе 2.4 приводится изображение пучка второй гармоники излучения, отраженной назад из канала. Показано, что при воздействии более, чем 60-ю лазерными импульсами, изображение начинает размываться. Отсутствие сильного рассеяния излучения, отраженного из канала, говорит о том, что взвесь в канале достаточно однородна и её плотность меньше критической для длины волны второй гармоники.

Третья глава диссертации посвящена описанию методических экспериментов по исследованию взаимодействия лазерного излучения с кластерными пучками на примере кластеров аргона.

В параграфе 3.1 описывается экспериментальная схема, которая включает в себя систему напуска газа, используемую для генерации кластерных струй, систему синхронизации лазерного излучения и газокластерного пучка; обсуждаются методики проведения экспериментов, направленных на изучение процессов лазерного взаимодействия с кластерами (схема приведена на рис. 3).

Параграф 3.2 посвящен характеристике используемого в экспериментах излучения лазера на титан-сапфире: обсуждаются условия, при которых не возникает фазовая самомодуляция, влияющая на качество пучка, описывается корреляционная методика измерения длительности лазерного импульса.

В параграфе 3.3. приведены спектры рентгеновского излучения, полученные из кластерной наноплазмы аргона и приводится оценка эффективности генерации характеристической рентгеновской линии ($E \sim 3 \text{ кэВ}$), которая составила $1 \cdot 10^{-7}$ и $1 \cdot 10^{-6}$ для лазерного излучения с «низким» и «высоким» контрастом ($K_{ns} \approx 10^5$, $K_{ps} \approx 2 \cdot 10^2$ и $K_{ns} \approx 5 \cdot 10^6$, $K_{ps} \approx 10^6$ соответственно).

В параграфе 3.4 подробно описывается оптимизация различных параметров по выходу рентгеновского излучения из наноплазмы аргоновых кластеров: положение вакуумного фокуса лазерного излучения относительно оси газокластерной струи, длительности и знака chirpирования лазерного импульса. Исследуются спектры лазерного излучения, прошедшие через кластерную струю и приводится оценка доли поглощенной в

струе энергии, сделанная из спектров и измеренная прямым способом. Из модификаций спектров следует вывод о том, что наиболее эффективно энергия лазерного излучения поглощается в области заднего фронта лазерного импульса.

В параграфе 3.5 приводятся зависимости интенсивности сигнала третьей гармоники лазерного излучения от положения вакуумного фокуса лазерного пучка относительно оси газокластерной струи. Обсуждается вид плазменных филаментов, зарегистрированных при различных параметрах и показывается, что при «низком» контрасте лазерного излучения, образуется многофокусный плазменный филамент (рис. 4). В то же время, при «высоком» контрасте лазерного излучения, плазменный филамент становится более однородным.

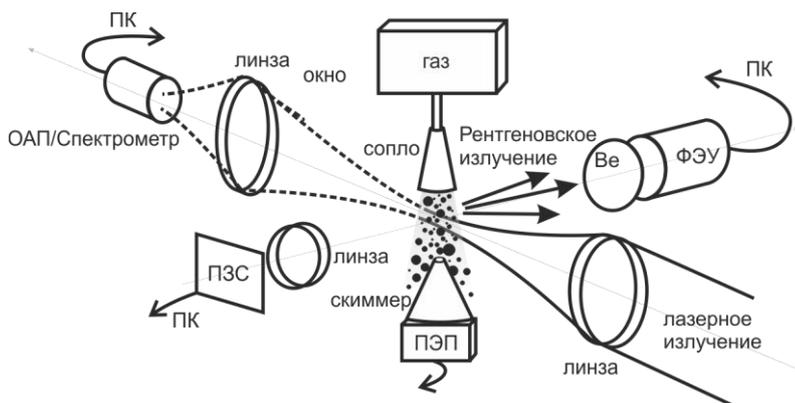


Рис. 3. Схема экспериментальной установки по измерению выхода рентгеновского излучения, его спектра, свечения плазменного филамента и диагностики кластерного пучка с помощью пироэлектрического приемника.

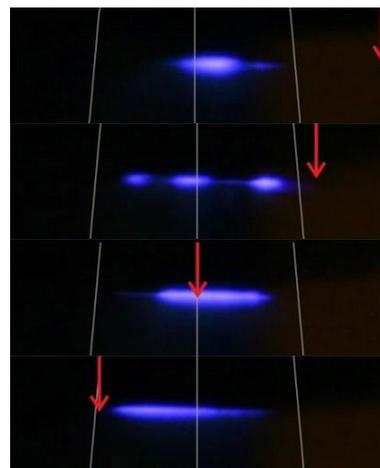


Рис. 4. Изображения филамента в струе аргоновых кластеров в зависимости от положения вакуумного фокуса излучения (обозначен стрелкой) относительно оси струи для линзы $f/20$ при «низком» контрасте лазерного излучения. Серые линии – примерные границы газокластерной струи и ее ось.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению эффективности генерации характеристического рентгеновского излучения в диапазоне 2-5 кэВ при фемтосекундном лазерном возбуждении кластеров многоатомных молекул SF_6 , CF_3I и CF_2Cl_2 и сопутствующим явлениям (генерации третьей гармоники излучения и образованию плазменного филамента). Исследуется возможность формирования смешанных кластеров, состоящих из атомов и молекул, их детектирования и получения источника двухэнергетического рентгеновского излучения.

В параграфе 4.1 обсуждаются критерии выбора молекул, при лазерном возбуждении кластеров которых ожидается эффективная генерация рентгеновского излучения. В качестве перспективных предлагаются многоатомные молекулы SF_6 , CF_3I и CF_2Cl_2 , которые эффективно кластеризуются в смеси с легким газом-носителем (аргон, гелий). Приводятся результаты диагностики кластеров молекул SF_6 и CF_3I двумя способами - с помощью пироприемника и сигнала рэлеевского рассеяния; демонстрируется, что при использовании смесей молекул с аргоном в высокой концентрации образуются крупные кластеры (рис. 5).

Параграф 4.2 посвящен генерации характеристического рентгеновского излучения при возбуждении молекулярных кластеров лазерным излучением с различным контрастом.

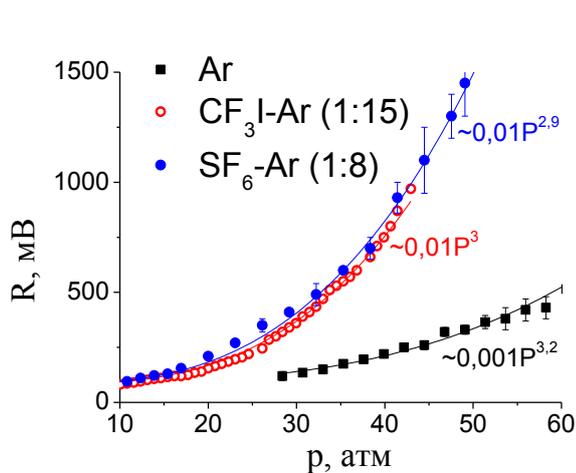


Рис. 5. Амплитуда сигнала рэлеевского рассеяния (R) для расширяющихся в вакуум смесей SF_6 -Ar (1:8) и CF_3I -Ar (1:15) и чистого аргона в зависимости от давления (p).

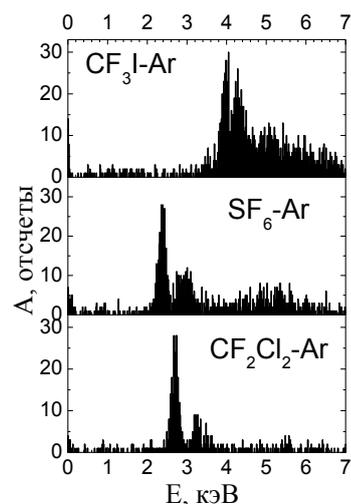


Рис. 6. Рентгеновские спектры для молекулярных кластеров, формирующихся в смесях CF_3I -Ar (1:15, 23 атм), SF_6 -Ar (1:8, 20 атм) и CF_2Cl_2 -Ar (1:9, 30 атм) (соответственно, сверху вниз).

Приводятся рентгеновские спектры (рис. 6) и значения полученных эффективностей преобразования энергии лазерного импульса в рентгеновские кванты и полный выход квантов за лазерный импульс при лазерном возбуждении кластеров SF_6 , CF_3I и CF_2Cl_2 , образующихся при расширении в вакуум смеси молекулярных газов с газом-носителем (аргоном/гелием). Рекордная эффективность была зарегистрирована для кластеров SF_6 и CF_2Cl_2 , образующихся в смеси с гелием, и составила $1,1 \cdot 10^{-5}$ и $2,0 \cdot 10^{-5}$. Эти величины на порядок выше, полученных в сходных экспериментальных условиях для кластеров аргона (параграф 3.3).

В параграфе 4.3 освещается проблема оптимизации выхода рентгеновского излучения из молекулярных кластеров; приводятся спектры основного излучения, прошедшего через газокластерную струю. Оптимизация и модификация спектров существенно не изменяются

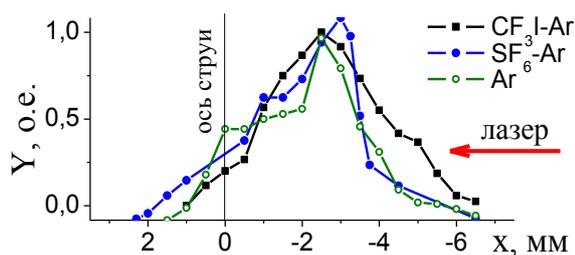


Рис. 7. Зависимость выхода жесткого рентгеновского излучения (Y) для кластеров аргона и молекулярных кластеров, формирующихся в смесях SF_6 -Ar (1:8, общее давление 26 атм) и CF_3I -Ar (1:30, общее давление 35 атм) от положения вакуумного фокуса излучения (x), сфокусированного линзой $f/20$, относительно оси газокластерной струи.

для случая молекулярных кластеров по сравнению с кластерами аргона. Оптимальная длительность лазерного импульса составляет порядка 300 фс, фокусировка линзой $f/20$ – в область переднего края газокластерной струи (рис. 7).

В параграфе 4.4 показано, что выход рентгеновского излучения достигает насыщения при давлениях газовой смеси более 30 атм, что связывается с нехваткой энергии в импульсе для возбуждения крупных кластеров. Также, обсуждается зависимость выхода рентгеновского излучения от интенсивности воздействующего лазерного излучения, которая является степенной зависимостью с показателем 1,5, что соответствует литературным данным, но не может объясняться с точки зрения увеличения эффективного фокального объема лазерного пятна.

Параграф 4.5 посвящен вопросам генерации третьей гармоники лазерного излучения и формированию плазменного филамента в молекулярных кластерах. Показано, что в струе смеси газов SF_6 -Ar в точках локального максимума выхода рентгеновского излучения сигнал третьей гармоники испытывает локальный минимум. Предлагается использовать данный эффект с целью диагностики областей горячей плазмы в газо-кластерной струе. Приводятся изображения плазменного филамента, образующегося при прохождении лазерного излучения через струи смесей SF_6 -Ar, CF_3I -Ar и CF_2Cl_2 -He, которые свидетельствуют о наличии процесса самофокусировки лазерного излучения. Так же как и для кластеров аргона, для «низкого» контраста лазерного излучения, филамент имеет многофокусную структуру (показано на примере SF_6 -Ar, CF_3I -Ar), а для «высокого» - однофокусную (показано на примере CF_2Cl_2 -He).

В *параграфе 4.6* освещается вопрос генерации смешанных кластеров, состоящих из молекул (CF_2Cl_2) и атомов (буферного газа аргона). Показано, что при воздействии лазерного излучения на смесь CF_2Cl_2 -Ar с концентрацией 1:32 в рентгеновском спектре, наряду с характеристической линией хлора, появляется линия аргона, что указывает на образование смешанных кластеров, содержащих и атомы Ar, и молекулы CF_2Cl_2 . Обнаружено, что добавление в используемую смесь третьего компонента - легкого газа гелия (смесь CF_2Cl_2 -Ar-He), позволяет управлять относительной интенсивностью характеристических рентгеновских линий аргона и хлора (рис. 8), т.е. варьировать концентрацию атомов в смешанных кластерах.

Заключение

Основные результаты, полученные в рамках настоящей диссертации можно сформулировать следующим образом:

1. Создана экспериментальная схема для исследования нелинейно-оптических процессов, возникающих при импульсно-периодическом воздействии интенсивного ($I \leq 10^{16}$ Вт/см²) фемтосекундного лазерного излучения на твердотельную мишень. Схема позволяет проводить измерения с использованием излучения лазерных систем на хром форстерите ($\tau=140$ фс, $\lambda=1,24$ мкм, $E \approx 600$ мкДж, частота следования импульсов $\nu=1-10$ Гц, наносекундный контраст $K \approx 300$). Проведены исследования особенностей выхода рентгеновского излучения и параметров второй гармоники лазерного излучения при формировании глубокого канала в мишени, находящейся как в условиях вакуума ($P \approx 0,01$ Торр), так и при нормальных условиях в воздухе.

2. Зарегистрировано, что при создании канала в прозрачном диэлектрике (на примере мишени из плавленного кварца), находящемся в вакууме или воздухе, в импульсно-

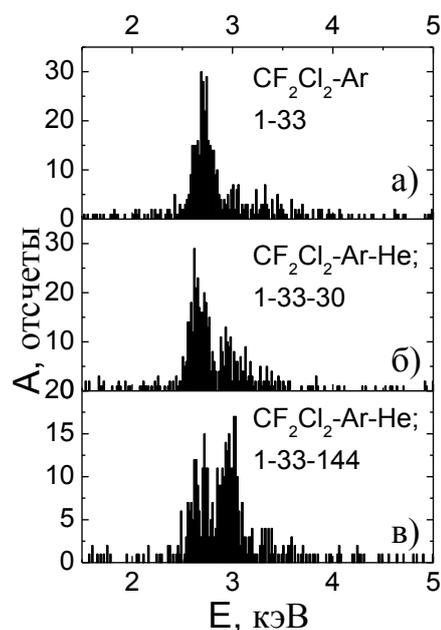


Рис 8. Спектры рентгеновского излучения из кластеров, формирующихся в смесях CF_2Cl_2 -Ar-He (общее давление 25 атм, концентрация смесей указана на графике) с различным парциальным давлением гелия: а) 0 атм; б) 8 атм; в) 20 атм.

периодическом режиме воздействия (частота 1-10 Гц) интенсивным (вакуумная интенсивность $I \approx 10^{16}$ Вт/см², $E \approx 5$ мДж) фемтосекундным лазерным излучением, динамика выхода рентгеновского излучения подобна динамике сигнала второй гармоники: они немонотонны и достигают максимума. Эффективность генерации рентгеновского излучения возрастает с $1 \cdot 10^{-7}$ до $6 \cdot 10^{-6}$ при формировании канала в мишени, находящейся в вакууме. В случае, если мишень находится в воздухе, эффективность генерации рентгеновского излучения возрастает с пятидесятипроцентной точностью $5 \cdot 10^{-9}$ до $6 \cdot 10^{-8}$. Эффективность ГВГ при формировании канала в мишени, находящейся в вакууме, возрастает с $5 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-3}$.

3. Впервые проведены исследования динамики спектра второй гармоники, которая генерируется в канале мишени (алюминий, плавленый кварц), находящейся в вакууме или в воздухе, по мере его формирования последовательностью фемтосекундных лазерных импульсов системы на хром-форстерите (частота 1-10 Гц, интенсивность $I \approx 10^{16}$ Вт/см², $\tau \approx 140$ фс). Обнаружено, что спектры второй гармоники испытывают голубой сдвиг, достигающий $\Delta\lambda \approx 25$ нм. Соответствующие сдвиги зарегистрированы и для спектра основного лазерного излучения. Наличие таких сдвигов (как в случае воздуха, так и в случае вакуума) может свидетельствовать о том, что в канале нарабатывается взвесь, в результате ионизации которой лазерным импульсом достигается электронная плотность с концентрацией $\approx 4 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

4. Создана экспериментальная установка для проведения исследований процессов, сопутствующих взаимодействию интенсивного ($I \sim 10^{16}$ Вт/см², фокусировка $f/d=10, 20$) фемтосекундного лазерного излучения лазера на титан-сапфире ($\tau_{\min} \approx 75$ фс, $\lambda=0,8$ мкм, $E \approx 0,5 \div 5$ мДж, $\nu=1,25$ Гц) с газо-кластерной струей. Установка включает в себя: 1) систему генерации и диагностики кластеров методом расширения в вакуум газов через коническое сопло, снабженное импульсным клапаном; 2) измерительную часть, позволяющую регистрировать выход и спектр жесткого рентгеновского излучения из кластерной наноплазмы, поглощение энергии лазерного излучения в кластерной струе и его спектр, а также генерацию гармоник фемтосекундного лазерного излучения и изображение свечения плазменного филамента в оптическом диапазоне.

5. Предложено использовать для эффективной генерации рентгеновского излучения крупные кластеры многоатомных молекул, образующихся при расширении в вакуум смеси молекулярных газов с легким газом-носителем с относительно высокой концентрацией. Впервые зарегистрировано характеристическое рентгеновское излучение (энергии линий: $E_S(K_\alpha) \approx 2,3$ кэВ, $E_I(L_\alpha) \approx 4$ кэВ, $E_I(L_\beta) \approx 4,2$ кэВ и $E_{Cl}(K_\alpha) \approx 2,6$ кэВ, $E_{Cl}(K_\beta) \approx 2,8$ кэВ) при фемтосекундном лазерном ($I \approx 6 \cdot 10^{15}$ Вт/см²) возбуждении кластеров SF₆, CF₃I и CF₂Cl₂, образующихся при расширении в вакуум смесей молекул с аргоном (концентрации 1:8, 1:15 и 1:9). Установлено на примере кластеров SF₆ и CF₂Cl₂ (смесь с гелием, концентрации газов в смеси 1:8 и 1:9 соответственно, давление смеси над клапаном ~ 30 атм), что выход характеристических рентгеновских квантов из кластерной наноплазмы может достигать рекордной величины порядка $2 \cdot 10^8$ фотонов за лазерный импульс при интенсивности лазерного импульса $I \approx 8 \cdot 10^{15}$ Вт/см², энергии $E \approx 5$ мДж и длительности ≈ 300 фс. При этом эффективность преобразования по энергии соответствует величине 10^{-5} . Это на порядок превышает эффективность, полученную нами в кластерах аргона при сходных экспериментальных условиях.

6. Впервые исследована взаимосвязь сигнала третьей гармоники, изображения свечения плазменного филамента в оптическом диапазоне и выхода жесткого ($E > 2$ кэВ) рентгеновского излучения из кластерной наноплазмы (кластеры SF_6 и CF_3I), образованной интенсивным ($I \approx 10^{16}$ Вт/см²) фемтосекундным ($\tau \approx 300$ фс) лазерным излучением (наносекундный и пикосекундный контраст $K_{ns} \approx 10^5$, $K_{ps} \approx 2 \cdot 10^2$), в зависимости от положения вакуумного фокуса лазерного излучения относительно оси газокластерной струи. Установлено, что максимальному выходу рентгеновского излучения, который достигается при фокусировке в область переднего края газо-кластерной струи, соответствует локальный минимум сигнала третьей гармоники и многофокусный плазменный филамент. При улучшении контраста лазерного излучения ($K_{ns} \approx 5 \cdot 10^6$, $K_{ps} \approx 10^6$), филамент в оптимальном режиме становится однофокусным.

7. Обнаружено, что при воздействии интенсивного фемтосекундного лазерного излучения на газокластерную струю смеси CF_2Cl_2 -Ar (концентрация газов 1:32, давление 20 атм), генерируются характеристические рентгеновские линии молекулярного газа ($E_{Cl}(K_\alpha) \approx 2,6$ кэВ, $E_{Cl}(K_\beta) \approx 2,8$ кэВ)) наряду с линией газа-носителя ($E_{Ar}(K_\alpha) \approx 3$ кэВ), что указывает на формирование смешанных кластеров, содержащих и атомы и молекулы. Впервые исследована трехкомпонентная смесь (CF_2Cl_2 -Ar-He) (концентрация CF_2Cl_2 -Ar 1:32, давление всей смеси 25 атм), и показано, что добавление к смеси CF_2Cl_2 -Ar гелия увеличивает выход характеристических рентгеновских квантов аргона, что свидетельствует об увеличении концентрации аргона в смешанных кластерах, из-за влияния гелия.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Гордиенко В. М., Джиджоев М. С., Жвания И. А., Макаров И. А. Увеличение выхода рентгеновских фотонов при двухимпульсном воздействии лазерным излучением на твердотельную мишень в воздухе // Квантовая Электроника. – 2007. – Т.37, №7. – С. 599-600.
2. Gordienko V. M., Zhvania I. A., Makarov I. A. Hot Microplasma in the Channel of a Solid Target Induced by a Sequence of Femtosecond Laser Pulses // Laser Physics. – 2008. – Т. 18, №4. – С. 1-7.
3. Гордиенко В. М., Джиджоев М. С., Жвания И. А., Петухов В. П., Платоненко В. Т., Трубников Д. Н., Хоменко А. С. Эффективная генерация K-характеристического рентгеновского излучения при лазерном возбуждении крупных кластеров SF_6 в присутствии газа носителя Ar // Письма ЖЭТФ. – 2010. – Т.91, №7. – С. 355-362.
4. Гордиенко В. М., Джиджоев М. С., Жвания И. А., Прибытков А. В., Трубников Д. Н., Федоров Д. О. Генерация рентгеновского излучения на L-переходах атомов йода при возбуждении крупных кластеров CF_3I фемтосекундным лазером // Квантовая Электроника. – 2012. – Т.42, №11. – С. 957-958.
5. Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Zhvaniya I. A., Platonenko V. T., Trubnikov D. N., Fedorov D. O. Hard X-ray generation and plasma filament formation under interaction of femtosecond laser with large molecular clusters // European Physical Journal D. – 2013. – V.67. – P.55.

6. Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Zhvaniya I. A., Trubnikov D. N., Fedorov D. O. Efficient x-ray line production from laser excited CF_2Cl_2 clusters. Mixed cluster formation and control of the x-ray line yield // *Laser Phys. Lett.* – 2014. – V.11. P. – 036003.
7. Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Makarov I. A., Zhvania I. A. Enhanced x-ray emission from hot plasma produced by double-pulse laser irradiation of solid target at atmospheric conditions // *Proc. SPIE.* – 2007. – Т. 6726. – С. 67261M.
8. Gordienko V. M., Zhvaniya I. A., Khomenko A. S. Dynamics of plasma production and harmonic generation under microchannel drilling in solid target by intense femtosecond laser // *Proc. SPIE.* – 2011. – Т. 7994. – С.79940P.
9. Gordienko V. M., Djidjoev M. S., Makarov I. A., Podshivalov A. A., Zhvania I. A. Hot plasma control and diagnostics during femtosecond Cr:forsterite laser micromachining in ambient air // International Conference “Fundamentals of Laser Assisted Micro– and Nanotechnologies «FLAMN-07» Book of Abstracts. – June 25- 28, 2007. – St. Petersburg, Russia. – С.13
10. Гордиенко В. М., Жвания И. А., Макаров И. А., Хоменко А. С. Модификация спектра отраженного фемтосекундного лазерного излучения в процессе формирования канала в твердотельной мишени // Пятая Международная Конференция «Фундаментальные проблемы оптики» «ФПО – 2008», Сборник трудов Международного оптического конгресса «Оптика-XXI век. – 20-24 октября, 2008. – Санкт – Петербург, Россия. – С.7.
11. Гордиенко В. М., Жвания И. А., Макаров И. А., Хоменко А. С. Модификация спектра второй гармоники при формировании микроканала в твердотельной мишени цугом сверхинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов // Молодежная школа-семинар Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства. – 1-4 октября, 2008. – Владимир, Россия.
12. Gordienko V. M., Khomenko A. S., Makarov I. A., Podshivalov A.A., Zhvania I. A. Hard X-ray emission and harmonic generation from femtosecond laser induced microchannel // International Conference Advanced Laser Technologies «ALT-08», Book of Abstracts of International Conference ALT-08. – September 13-18, 2008. – Siofok, Hungary. – С. 115.
13. Жвания И.А., Макаров И.А. Генерация жесткого рентгеновского излучения и второй гармоники при формировании микроканала в твердотельной мишени сверхинтенсивными фемтосекундными импульсами // XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2009", Материалы докладов. – 13 -18 апреля, 2009. – Москва, Россия. – С. 6.
14. Gordienko V. M., Zhvaniya I. A., Khomenko A. S. Dynamics of plasma production and harmonic generation under microchannel drilling in solid target by intense femtosecond laser // Technical Digest on CD-ROM of the Int'l Conference on Coherent and Nonlinear Optics «ICONO/LAT 2010». – August 23-26, 2010. – Kazan, Russia.
15. Жвания И. А. Создание крупных кластеров SF_6 и диагностика размеров кластерной струи методом генерации третьей гармоники лазерного излучения сверхкороткой длительности // Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2010", Материалы докладов. – 12 - 15 апреля, 2010. – Москва, Россия.

16. Gordienko V.M., Djidjoev M.S., Fedorov D.O., Platonenko V.T., Pribytkov A.V., Trubnikov D.N., Zhvania I.A . Advanced femtosecond laser technologies with atomic and molecular cluster beams // 19th International Conference on Advanced Laser Technologies – ALT'11, Book of Abstracts, – 03-08 September, 2011. – Golden Sands, Bulgaria – P. 62.
17. Zhvaniya I. A., Fedorov D. F. Plasma filament and spectral modification in the intense laser-cluster interaction // 2-nd International Conference "Terahertz and Microwave radiation: Generation, Detection and Applications" Scientific school "Nonlinear optics and terahertz radiation". – 20 - 21 June, 2012. – Moscow, Russia.
18. Zhvaniya I. A., Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Fedorov D. O., and Trubnikov D.N. Hard X-ray generation accompanied with self-guided propagation of femtosecond laser radiation in molecular cluster beam // International conference Laser Optics 2012, Technical Digest. – 25-29 June, 2012. – St. Petersburg, Russia. – WeR5-13.
19. Zhvaniya I. A., Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Fedorov D. O., Trubnikov D. N. Generation of line X-rays from femtosecond cluster plasma using mixture of polyatomic molecules and noble gases // Int'l Conference on Coherent and Nonlinear Optics ICONO/LAT13, Technical Digest. – 18-22 June, 2013. – Moscow, Russia. – IFR10.
20. Гордиенко В. М., Джиджоев М. С., Жвания И. А., Прибытков А. В., Трубников Д. Н., Федоров Д. О. Диагностика процесса кластеризации методом светорассеяния при импульсном расширении сверхкритического CO₂ флюида в вакуум// VII Научно-практическая конференция с международным участием «Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации», Материалы докладов. – 16–21 сентября, 2013. – Зеленоградск, Россия. – С. 246.
21. Gordienko V. M., Dzhidzhoev M. S., Zhvaniya I. A., Trubnikov D.N., Interaction of intense femtosecond pulses with large molecular clusters: Toward bright X-ray sources // Advanced Laser Technologies (ALT'13), Technical Digest. – 16-20 September, 2013. – Budva, Montenegro. – LM-I-14.