

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА»

На правах рукописи

Иванов Константин Анатольевич

**Роль предымпульса в формировании быстрого
электронного компонента при фокусировке
субтераваттного фемтосекундного лазерного излучения
на поверхность жидких и твердых мишеней**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

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

Научный руководитель: **Савельев-Трофимов Андрей Борисович**
доктор физико-математических наук, профессор,
физический факультет федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Официальные оппоненты: **Матафонов Анатолий Петрович**
доктор физико-математических наук, заместитель
начальника отдела, федеральное государственное
унитарное предприятие «Центральный научно-
исследовательский институт машиностроения»

Волков Георгий Степанович
кандидат физико-математических наук, старший научный
сотрудник, государственный научный центр Российской
Федерации «Троицкий институт инновационных и
термоядерных исследований»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки «Институт общей физики имени А.М. Прохорова
Российской академии наук»

Защита состоится «6» июня 2013 года в 16 час. 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д.501.001.31 при федеральном государственном бюджетном
образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский
государственный университет имени М.В. Ломоносова», по адресу: 119991 Москва,
ГСП-1, Ленинские Горы, д. 1, стр. 62 «Корпус нелинейной оптики», аудитория имени
С.А. Ахманова.

С текстом диссертации можно ознакомиться в Отделе диссертаций Научной
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский пр-т, д.27).

Автореферат разослан « » апреля 2013 г.

Ученый секретарь совета,
кандидат физико-математических наук

А.А. Коновко

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Прогресс, достигнутый в последние десятилетия в области создания нового поколения фемтосекундной лазерной техники, позволяет получать лазерные импульсы длительностью вплоть до нескольких оптических периодов и энергией до нескольких джоулей. При фокусировке такого излучения достигается пиковая интенсивность от 10^{16} до 10^{23} Вт/см², что уже на фронте лазерного импульса обеспечивает полевую ионизацию атомов мишени. Лазерная плазма, формируемая при таком взаимодействии, представляет большой интерес благодаря уникальным в своём роде свойствам, среди которых одним из самых важных является существенная неравновесность распределения электронов по скоростям. В плазме, помимо теплового электронного компонента, за счёт действия различных бесстолкновительных механизмов поглощения энергии лазерного излучения появляются быстрые (так называемые «горячие») электроны, энергия которых может достигать десятков и сотен МэВ. Проникновение электронов вглубь мишени ведёт к генерации тормозного и линейчатого жёсткого рентгеновского и гамма-излучений. Подобного рода лазерно-плазменные источники получили широкое распространение при создании компактных ускорителей и источников сверхкоротких рентгеновских импульсов, инициировании ядерных реакций, терапии раковых опухолей, реализации рентгеновских методик диагностики с высоким временным разрешением и т.д.

Обычно выделяют несколько основных диапазонов интенсивности лазерного излучения, в которых преобладают те или иные механизмы генерации горячего электронного компонента: 1) область умеренных интенсивностей (до $\sim 10^{17}$ Вт/см²), в которой основными механизмами ускорения электронов принято считать резонансное поглощение, вакуумный нагрев и аномальный скин-эффект, 2) область релятивистских интенсивностей (от $\sim 10^{18}$ Вт/см² и до 10^{21} Вт/см²), в которой основной вклад в ускорение электронов дают стохастический нагрев, пондеромоторное действие света, ускорение в «кильватерных» волнах и другие, 3) промежуточную область субрелятивистских интенсивностей (от $\sim 10^{17}$ до 10^{18} Вт/см²), в которой в той или иной степени могут проявляться все механизмы, а также 4) пока еще мало изученную область ультрарелятивистских интенсивностей (свыше 10^{21} Вт/см²), в которой энергия покоя ионов оказывается сравнимой с энергией электронов.

В области субрелятивистских интенсивностей сильное влияние на проявление тех или иных эффектов оказывает контраст лазерного импульса

(наличие предимпульсов, опережающих основной импульс на пико- и наносекундных масштабах времени). Сравнительно низкий контраст излучения (высокая интенсивность предимпульсом), приводит к тому, что основной импульс будет взаимодействовать не с резкой границей мишени, а сильно размытой и искажённой под действием предимпульсов. С одной стороны, образование преплазменного слоя препятствует проникновению лазерного излучения до плотных слоёв плазмы вследствие диссипации энергии. С другой стороны, в образующейся преплазме могут происходить эффекты самовоздействия лазерного излучения, повышающие его пиковую интенсивность и приводящие к появлению в плазме релятивистских эффектов ускорения электронов.

В связи с перспективами применения лазерной плазмы в целом ряде задач, встаёт вопрос об оптимизации и повышении эффективности преобразования энергии лазерного излучения в энергию частиц. Традиционно, направление работ в этой области связано с использованием специально приготовленных (микро- и наноструктурированных) мишеней, при взаимодействии с которыми могут происходить эффекты усиления локального поля, подавления теплопроводности вглубь мишени, в конечном итоге приводящие к росту энергии частиц в плазме. Однако необходимым условием использования таких мишеней является высокий контраст лазерного импульса (отсутствие предимпульсов, опережающих основной импульс на разных масштабах времени). Так, если интенсивность короткого предимпульса превышает порог плазмообразования или плавления, то будет происходить разрушение поверхностных структур к моменту прихода основного импульса и, как следствие, подавление желаемого эффекта.

Однако, как показывает ряд исследований, воздействие предимпульсов на мишень может само по себе приводить к микромодифицированию поверхности вещества. Обнаружено, что большой интерес в этом отношении представляет применение в качестве мишени вещества в жидкой фазе, структурирование поверхности которого возможно при определённых условиях. Исследование взаимодействия лазерного импульса с подобного рода мишенью представляет интерес еще и потому, что она обладает рядом преимуществ перед другими видами мишеней: жидкую мишень не надо ни сдвигать, ни обновлять после каждого лазерного выстрела, что значительно облегчает конструирование возможных источников быстрых частиц и излучения из плазмы с высокой частотой повторения импульсов.

Диагностика лазерной плазмы представляет собой достаточно трудоёмкую задачу, включающую в себя целый ряд различных методик. Одной из самых простых является измерение спектра плазмы в рентгеновском диапазоне, дающее

простые оценки на энергии электронов с учётом тормозного характера спектра плазмы. Тем не менее, при проведении подобных измерений непременно появляется ряд трудностей. Во-первых, при измерении рентгеновских спектров необходимо знать эффективность детектора, связанную, в частности, с малой вероятностью поглощения фотонов относительно высоких энергий (свыше нескольких сотен кэВ). Во-вторых, искажение формы спектра может возникнуть при большом числе наложений квантов, регистрируемых в одном лазерном импульсе в режиме счёта фотонов. Очевидно, если среднее число регистрируемых событий за один лазерный выстрел превышает, грубо говоря, единицу, то спектр будет претерпевать существенные искажения. Получение корректных оценок параметров плазмы в этих условиях невозможно без привлечения методов восстановления исходных параметров плазмы по измеренным.

Цели диссертационной работы

1. Разработка методики измерения рентгеновских спектров плазмы (в диапазоне энергий квантов 10 кэВ – 10 МэВ), создаваемой фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью порядка релятивистской, с помощью сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов NaI в режиме счета фотонов и обработки этих спектров для получения оценки на среднюю энергию наиболее быстрого электронного компонента плазмы.

2. Определение ключевых характеристик предимпульсов фемтосекундного лазерного импульса на пико- и наносекундном масштабах времени, существенно влияющих на ускорение электронов в плазме, создаваемой на поверхности твердотельных и жидких мишеней этим импульсом с субрелятивистской интенсивностью, и оптическая диагностика облака формируемой предимпульсом плазмы.

Научная новизна работы

1. Обнаружено, что при воздействии на мишень из расплавленного металла двух последовательных импульсов с энергиями ~ 30 и 1000 мкДж и интенсивностями 1.5×10^{15} и 5×10^{16} Вт/см², отстоящих друг от друга на несколько наносекунд, наблюдается значительный рост средней энергии быстрых электронов (с 20 до 75 кэВ) и существенное увеличение выхода жёсткого рентгеновского излучения из плазмы по сравнению с случаем воздействия одного импульса с интенсивностью 5×10^{16} Вт/см².

2. Продемонстрировано, что воздействие на мишень из расплавленного металла (галлия) фемтосекундного импульса с энергией от 30 до 200 мкДж и

интенсивностью от 1.5×10^{15} до 10^{16} Вт/см² ведёт к формированию на поверхности мишени повторяющихся от выстрела к выстрелу микроструктур в виде плотных струй, вылетающих от поверхности, длина которых в зависимости от энергии импульса составляет от десяти до сотни микрон, а время существования от момента формирования до размытия – около 15 нс. Именно взаимодействие с такими струями фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью около 10^{17} Вт/см², согласно результатам численного моделирования методом PIC-кода, проведённого А.В. Брантовым, приводит к усилению локальных электрических полей и появлению в плазме электронов с аномально высокой энергией (до нескольких десятков кэВ).

3. Показано, что увеличение длительности лазерного импульса с 45 до 350 фс приводит к существенному возрастанию средней энергии быстрых электронов (от нескольких сотен кэВ до МэВ) при взаимодействии лазерного излучения с интенсивностью от 10^{17} до 10^{18} Вт/см² с протяженным (характерный пространственный масштаб более десяти длин волн) преплазменным слоем докритической плотности, образующимся под действием усиленной спонтанной люминесценции (ASE, относительная амплитуда около 10^{-5}) на поверхности твердотельных металлических мишеней (железа и свинца).

Аналогичного результата не наблюдается для мишени с высоким порогом пробоя (плавленого кварца), а также при использовании импульса с уровнем ASE около 10^{-8} , когда пространственный масштаб преплазменного слоя не превышает нескольких длин волн.

Практическая ценность

В диссертационной работе получен ряд результатов, способных найти своё применение при исследовании лазерно-плазменного взаимодействия, физики плазмы, а также для решения целого ряда прикладных и фундаментальных задач.

Разработанная методика обработки рентгеновских и гамма спектров плазмы, измеренных в режиме счёта квантов, позволяет оценить искажения формы рентгеновских спектров плазмы при их регистрации с помощью сцинтилляционных детекторов на основе кристалла NaI и получить оценки на среднюю энергию быстрых электронов в плазме.

Предложенный способ повышения выхода жёсткого рентгеновского излучения из плазмы за счёт микроструктурирования поверхности мишени из расплавленного металла путём введения предимпульса, опережающего основной на несколько наносекунд, может найти широкое применение при создании высокостабильных рентгеновских источников, способных работать на большой

частоте следования лазерных импульсов. Подобный источник по своим характеристикам превосходит аналогичные, создаваемые при схожих параметрах греющего лазерного импульса на мишенях с применением расплавленных металлов.

Генерируемые в плазме, создаваемой на поверхности металлических мишеней лазерным импульсом субрелятивистской интенсивности с высоким уровнем усиленной спонтанной люминесценции, горячие электроны с средней энергией до 1 МэВ и гамма-кванты с энергией свыше 4 МэВ, открывают целый класс новых задач, связанных с исследованием ядерных процессов, инициированием низкопороговых реакций, получением пучков электронов, ионов и нейтронов при помощи компактных лазерных систем субтераваттной мощности.

Защищаемые положения

1. Воздействие фемтосекундного импульса с энергией от нескольких десятков до нескольких сотен мкДж и интенсивностью от $\sim 10^{15}$ до $\sim 10^{16}$ Вт/см² на поверхность мишени из расплавленного галлия приводит к образованию плотных микроструктур в виде струй, характерное время жизни которых от момента формирования до размытия составляет около 15 нс.

2. При взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью около 5×10^{16} Вт/см² с микроструями, формируемыми на поверхности расплавленного галлия предимпульсом с указанными характеристиками, наблюдается существенный рост выхода жёсткого рентгеновского излучения и средней энергии горячих электронов в плазме (с 20 до 75 кэВ) по сравнению со случаем взаимодействия с невозмущённой предимпульсом поверхностью.

3. Использование фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью около 10^{18} Вт/см² при уровне усиленной спонтанной люминесценции около 10^{-5} приводит к существенному повышению средней энергии наиболее высокоэнергетичного электронного компонента, возникающего при воздействии этого импульса на твердотельные металлические мишени (железо, свинец), по сравнению со случаем, в котором уровень усиленной спонтанной люминесценции составляет около 10^{-8} .

4. Увеличение длительности лазерного импульса с 45 до 350 фс при сохранении его энергии (максимальная интенсивность 10^{18} Вт/см² при длительности 45 фс) и уровне усиленной спонтанной люминесценции около 10^{-5} приводит к появлению в плазме, формируемой на поверхности металлических мишеней (железо, свинец), нового горячего электронного компонента со средней

энергией до 1 МэВ, отсутствующего при уровне усиленной спонтанной люминесценции около 10^{-8} .

Апробация работы и публикации

Основные результаты исследований, представленные в диссертационной работе докладывались автором на следующих научных конференциях: международная конференция Laser Optics 2008 (Санкт-Петербург, Россия, 2008) и Laser Optics 2010 (Санкт-Петербург, Россия, 2010), II Школа молодых учёных «Актуальные проблемы физики» (Москва, Россия, 2008), международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2009» (Москва, Россия, 2009), международная конференция Advanced Laser Technologies 2009 (Анталья, Турция, 2009), Третья Высшая Лазерная Школа «Современные проблемы лазерной физики» (Москва, Россия, 2009), международная конференция «Frontiers of Nonlinear Physics 2010» (Нижний Новгород – Санкт-Петербург, Россия, 2010), 8-й Российский симпозиум «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах» (Новый Афон, Абхазия, 2010), 4-ая международная конференция «Superstrong Fields in Plasmas 2010» (Варенна, Италия, 2010), международная школа для молодых учёных «68th Scottish Universities Summer School in Physics» (Глазго, Шотландия, 2011), Пятые Черенковские чтения «Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц» (Москва, Россия, 2012), Ломоносовские Чтения 2013 (Москва, Россия, 2013), международная конференция SPIE Optics and Optoelectronics 2013 (Прага, Чехия, 2013).

По теме диссертации опубликовано 5 статей [1-5] в реферируемых журналах из списка ВАК России, включенных в систему цитирования Web of Science, а также издано в печатном виде 13 тезисов докладов [6-18] международных и российских конференций.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе оригинальные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялись проведение экспериментов, обработка и анализ экспериментальных данных, разработка методики обработки рентгеновских спектров плазмы. При участии автора проводилось моделирование лазерно-плазменного взаимодействия и интерпретация результатов численного счёта.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Работа изложена на 123 страницах, включает в себя 47 рисунков, 16 формул, 3 таблицы и список литературы (общее число ссылок - 133).

Краткое содержание диссертации

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований в рамках диссертационной работы, ставятся цели работы, сформулированы научная новизна, практическая ценность представленной работы.

В **Первой главе** работы рассмотрен вопрос о генерации теплового и горячего электронных компонентов в плазме, формируемой на поверхности вещества под воздействием мощного сверхкороткого лазерного импульса при различных условиях взаимодействия. В первой части приводится обзор основных механизмов ускорения электронов по мере роста интенсивности лазерного излучения от умеренной (10^{16} Вт/см²) до релятивистской (свыше 10^{18} Вт/см²), среди которых рассматриваются резонансное поглощение, вакуумный нагрев, пондеромоторное ускорение, стохастический нагрев и другие. Далее обсуждается влияние различных факторов (структуры поверхности мишени и контраста лазерного импульса) на процесс набора электронами энергии. В частности, показано, что при использовании поверхностно-структурированных мишеней можно добиться существенного роста энергии электронов за счёт усиления локальных электрических полей на микронеоднородностях плазмы. При этом модифицированная поверхность может быть не только специально заранее приготовленной, но и индуцированной самим лазерным импульсом и его предимпульсами. Показано также, что, варьируя размер преплазменного слоя, формируемого фронтом импульса или, опять же, предимпульсами, можно существенно увеличить поглощение энергии лазерного импульса плазмой, что, в конечном итоге, повышает энергию частиц.

Вторая глава посвящена рентгеновской методике диагностики параметров лазерной плазмы, а именно, измерению спектра жёсткого рентгеновского излучения плазмы в режиме счёта фотонов с использованием наиболее распространённых сцинтилляционных детекторов на кристалле NaI.

Продemonстрировано, что для корректной оценки средней энергии наиболее высокоэнергетичного компонента (наиболее интересного для исследования) оптимальная загрузка, при которой не происходит существенного искажения регистрируемого спектра за счёт наложений, составляет от 0.1 до 0.5 событий на один лазерный выстрел.

В среде программирования LabView создана программа для моделирования регистрации рентгеновских квантов наиболее распространёнными сцинтилляционными детекторами на кристалле NaI и учёта физических процессов взаимодействия рентгеновских квантов с веществом, приводящих к искажениям формы измеряемого спектра относительно исходного спектра плазмы.

Проведенное сравнение откликов детектора на рентгеновский источник Cs-137 с линией 662 кэВ, моделированного с применением широко распространённого в среде ядерной физики кода GEANT3 и в созданной программе, показало, что ключевой параметр сцинтиллятора – отношение пьедестала комптоновского рассеяния к пику полного поглощения – находится в хорошем согласии в двух моделях (Рис.1).

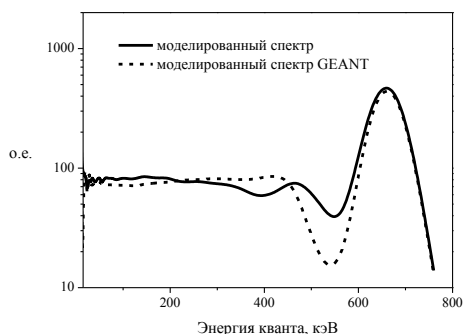


Рис.1. Спектры источника Cs-137, полученные моделированием с использованием кода GEANT3 (пунктирная кривая) и созданного кода (черная кривая). Уширение линии связано с разрешающей способностью детектора.

Восстановление спектра плазмы проводилось при моделировании методом Монте-Карло регистрации квантов с распределением вида $W = \sum_i A_i \exp(-E_{X-ray}/E_{hot_i})$, что соответствует спектру тормозного рентгеновского излучения плазмы, вычислении среднеквадратичного отклонения экспериментально измеренного спектра от моделированного и нахождении параметров A_i и E_{hot_i} , при которых достигается минимум отклонения, Рис.2(а,б).

Таким образом, разработанная методика экспериментального измерения спектра жёсткого рентгеновского излучения плазмы и численного восстановления исходного спектра позволяет получить оценки на средние энергии горячих электронных компонентов плазмы.

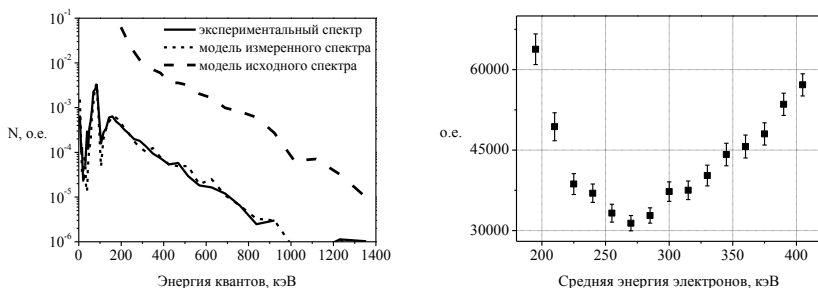


Рис.2. а – экспериментально измеренный гамма-спектр плазмы (сплошная кривая), наиболее близкий к нему результат моделирования измерения спектра (штриховая линия) и модель исходного спектра (пунктирная линия) и б – среднее квадратичное отклонение экспериментального спектра от моделированного при различном задаваемом значении средней энергии наиболее высокоэнергетического электронного компонента.

В Третьей главе приводится описание параметров лазерной системы на кристалле Ti:Sapphire, с использованием которой были получены оригинальные экспериментальные результаты работы. Также глава содержит в себе данные экспериментального исследования взаимодействия фемтосекундного лазерного импульса с энергией 1 мДж и интенсивностью около 5×10^{16} Вт/см² с поверхностью мишени в жидкой фазе (расплавленного галлия, нагретого до 300°C). Рентгеновская диагностика плазмы показала, что введение предимпульса с энергией от нескольких единиц до нескольких сотен мкДж и интенсивностью от $\sim 5 \times 10^{14}$ до $\sim 10^{16}$ Вт/см² (относительная амплитуда предимпульса – от 400^{-1} до 10^{-1}), опережающего основной импульс на 12.5 нс, приводит к росту средней энергии быстрых электронов в плазме и выхода жёсткого рентгеновского излучения по сравнению с случаем без предимпульса (относительная амплитуда предимпульса – 2×10^{-7}). Вместе с тем, при энергии предимпульса в 25 мкДж (относительная амплитуда $\sim 40^{-1}$) и его интенсивности около 1.5×10^{15} Вт/см² наблюдается максимум возрастания средней энергии электронов (с 20 до 75 кэВ, Рис.3(а)) и увеличение выхода жёсткого рентгеновского излучения почти на два порядка, Рис.3(б). Такое поведение не характерно для твердотельных мишеней. В то же время, средняя энергия горячих электронов в 18 ± 2 кэВ при наименьшей амплитуде предимпульса (2×10^{-7}) находится в разумном согласии с теоретическим значением в 18 кэВ для механизма резонансного поглощения, а также с результатами, полученными на твердотельной мишени.

Кроме того параметры плазмы слабо зависят от направления линейной поляризации лазерного импульса, что может быть связано с сильной

деформаций под воздействием предимпульса поверхности, которая и обеспечивают ускорение электронов как для p -, так и для s -поляризации (по отношению к средней поверхности). Независимость параметров плазмы от поляризации в отсутствии предимпульса, по всей видимости, связана с тем, что при частоте повторения импульсов в 10 Гц на поверхности мишени образуется неглубокий кратер. В этом случае для s -поляризованного излучения появляется компонента электрического поля, направленная вдоль локальной нормали к границе мишени.

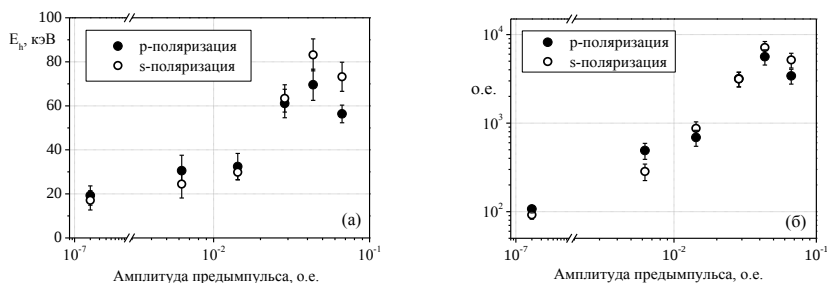


Рис.3. Зависимости средней энергии горячих электронов (а) и выхода жёсткого рентгеновского излучения (б) от амплитуды предимпульса.

Оптическая диагностика облака плазмы, формируемого коротким импульсом, показала, что через несколько наносекунд после воздействия излучения на мишень из расплавленного галлия поверхность расширяющейся области начинает сильно искажаться, образуя спустя несколько наносекунд микроструктуры в виде плотных плазменных струй (Рис.4). Скорость разлёта струй составляет 6 ± 1 км/с при энергии греющего импульса в 200 мкДж, а длина достигает 50 мкм. Важно отметить, что, по всей видимости, имеет место не тепловое расширение плазмы, а гидродинамический эффект, появляющийся вследствие ударного (сверхкороткого) характера воздействия излучения на мишень.

При этом в поперечном относительно плоскости падения излучения наблюдается от выстрела к выстрелу 2-4 симметричных структуры, Рис.4(а). В то время как в плоскости падения наблюдаются две структуры (струи), одна из которых направлена примерно навстречу падающему импульсу, а другая – вдоль отражённого от поверхности излучения, Рис.4(б). Время существования струй от момента образования до размытия – около 15 нс.

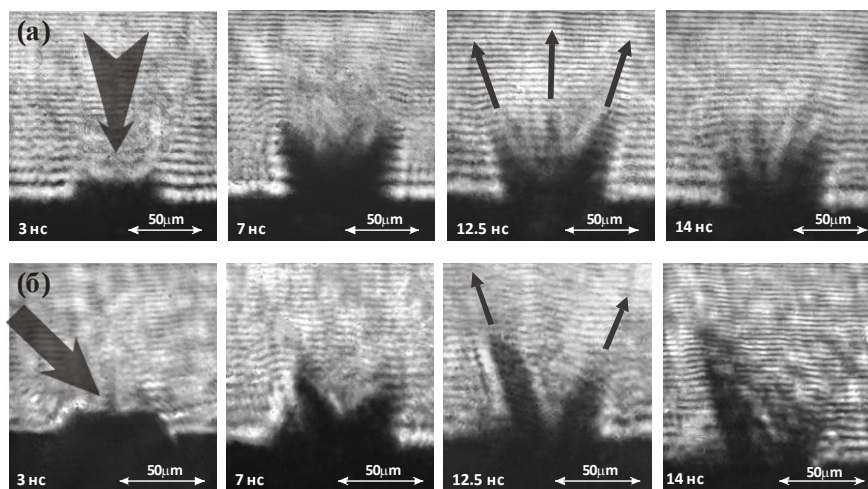


Рис.4. Теневые фотографии облака плазмы, создаваемого предимпульсом, в плоскости, поперечной направлению распространения греющего излучения (а), и в плоскости падения греющего излучения (б) при энергии греющего импульса 200 мкДж. Серая стрелка указывает направление распространения греющего импульса.

При изменении энергии греющего импульса от 30 до 200 мкДж (что соответствует интенсивности от 1.5×10^{15} до 10^{16} Вт/см²) обнаружилось, что форма микроструктур остаётся прежней, изменяются лишь их характерные размеры, Рис.5. При меньших значениях энергии наблюдать струи не позволяло разрешение и увеличение оптической системы переноса изображения.

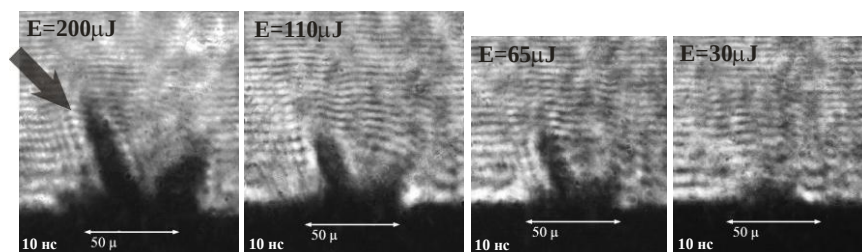


Рис.5. Теневые фотографии облака плазмы, создаваемого предимпульсом, в плоскости падения греющего излучения при различных его энергиях спустя 10 нс после воздействия. Серая стрелка указывает направление распространения греющего импульса.

Численное моделирование лазерно-плазменного взаимодействия с помощью 3-х мерного PIC кода Mandor, проведённое А.В. Брантовым, показало, что эффект существенного возрастания средней энергии горячих электронов в плазме можно связать с усилением локального электрического поля, возникающего при взаимодействии короткого лазерного импульса с подобными микроструктурами, что приводит к более эффективному ускорению частиц вдоль поверхности струй вглубь мишени и на их остриях.

Сам механизм формирования струй остаётся не до конца ясным. Однако одномерное численное моделирование разлёта плазмы после воздействия короткого импульса на мишень, проведённое М.Е. Поварницыным, показало, что на временах нескольких наносекунд после воздействия в преплазме образуются области отрицательного давления, приводящие к отрыву вещества от поверхности.

Основные результаты Третьей главы представлены в работах [1-4,6-9,11,13-15,18].

В Четвёртой главе диссертационной работы обсуждаются результаты экспериментального изучения влияния контраста лазерного импульса (предимпульсов на разных масштабах времени и уровня усиленной спонтанной люминесценции) на ускорение электронов в плазме, создаваемой на поверхности твердотельных мишеней с различным порогом пробоя (металлов и диэлектрика) излучением с интенсивностью порядка релятивистской. При измерении спектров жёсткого рентгеновского излучения плазмы и их обработке согласно методике, изложенной во Второй главе диссертационной работы, показана ключевая роль преплазменного слоя, определяемого уровнем усиленной спонтанной люминесценции лазерного импульса, в ускорении электронов в плазме, создаваемой этим импульсом на поверхности твердотельных мишеней. Обнаружено, что при взаимодействии импульса длительностью около 40 фс с высоким контрастом (уровень усиленной спонтанной люминесценции ASE около 10^{-8} , тип контраста «1») с поверхностью железной мишени, когда граница мишени остаётся достаточно резкой (характерный масштаб размытости мишени L/λ менее одной длины волны), в плазме генерируется горячий электронный компонент с средней энергией около 100 кэВ при интенсивности 7×10^{17} Вт/см², а генерация быстрых заряженных частиц определяется пондеромоторным ускорением и $\vec{j} \times \vec{B}$ нагревом на резкой границе, Таблица 1, Рис.6(а).

Воздействие на металлические мишени (железо и свинец) импульса длительностью около 45 фс с высоким уровнем ASE (около 10^{-5} , тип «3») сопровождается образованием на поверхности протяжённого преплазменного слоя с плотностью близкой к критической и характерным масштабом разлёта L/λ

более десяти длин волн, что приводит к значительному росту средней энергии электронов (до 175 кэВ для железа при интенсивности 7×10^{17} , Рис.6(б), и до ~500 кэВ для свинца при 10^{18} Вт/см², Таблица 1). Наблюдаемый эффект может быть связан с тем, что по мере распространения в разреженном облаке преплазмы лазерный импульс испытывает самофокусировку, повышающую его пиковую интенсивность, а, достигая плотных слоёв преплазмы, начинают играть роль релятивистские эффекты генерации быстрых частиц, такие как ускорение электронов в плазменной волне при параметрическом рассеянии в области плазмы с плотностью в четверть критической. При этом, существенно большая энергия в случае свинцовой мишени может быть связана как с большей интенсивностью, так и с различными условиями образования преплазменного слоя.

Тип контраста	Материал мишени	Длительность импульса			
		~45 фс		~350 фс	
		Интенсивность, Вт/см ²	Средняя энергия электронов, кэВ	Интенсивность, Вт/см ²	Средняя энергия электронов, кэВ
Тип «1»	Fe	7×10^{17}	95±15	8×10^{16}	35±5
		2×10^{18}	270±30	2.3×10^{17}	45±5
Тип «2»	Fe	2×10^{18}	200±10	2.3×10^{17}	50±5
Тип «3»	Fe	7×10^{17}	175±15	8×10^{16}	380±30
	Pb	10^{18}	560±180	1.2×10^{17}	870±80
	SiO ₂	7×10^{17}	300±35	8×10^{16}	60±10

Таблица 1. Средние энергии горячих электронов в различных условиях взаимодействия лазерного излучения с веществом.

В случае мишени из плавленого кварца размер преплазменного слоя оказывается значительно меньше (в силу более высокого порога пробоя), а ускорение электронов определяется резонансным поглощением в области критической плотности плазмы.

Введение короткого фемтосекундного предимпульса с интенсивностью около 5×10^{14} Вт/см², опережающего основной импульс на 12.5 нс при уровне ASE около 10^{-8} (тип «2»), приводит к формированию протяжённого (до сотни микрон) преплазменного слоя, плотность которого к моменту прихода основного импульса успевает значительно упасть. Энергия горячих электронов при этом понижается по сравнению с случаем отсутствия предимпульса на наносекундном

масштабе времени, что, вероятно, связано с диссипацией энергии в образующемся облаке вещества (Таблица 1).

Увеличение длительности лазерного импульса с 45 до 350 фс с сохранением его энергии приводит к значительному росту средней энергии горячих электронов (до 380 кэВ для железной мишени, Рис.6(г), и почти до 1 МэВ для свинцовой, Таблица 1) в плазме с протяжённым преплазменным слоем высокой плотности, создаваемой на поверхности металлических мишеней импульсом с уровнем усиленной спонтанной люминесценции около 10^{-5} (тип «3»). Наблюдаемый эффект связан, по всей видимости, с появлением в плазме нового горячего электронного компонента, поскольку в случае ускорения электронов в плазменной волне при параметрическом рассеянии энергия частиц определяется во многом интенсивностью, а она, в свою очередь падает с ростом длительности импульса.

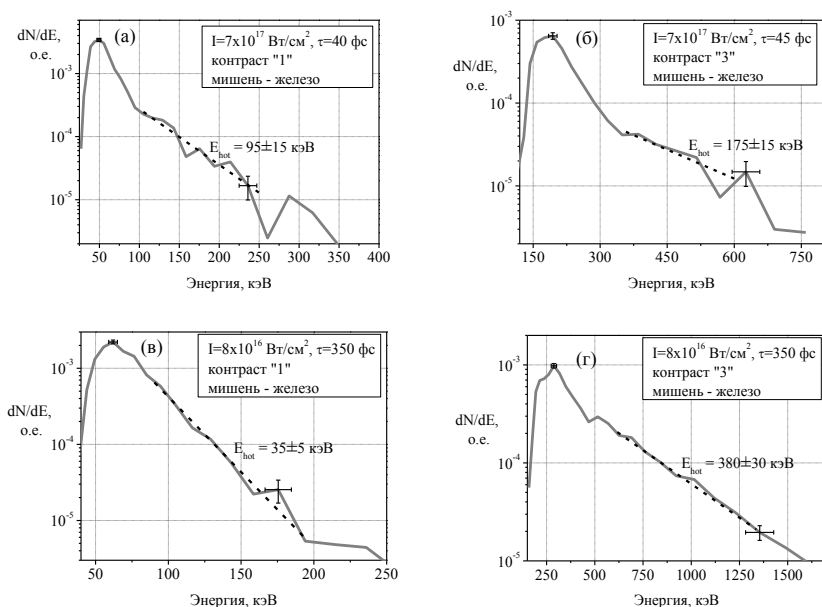


Рис.6. Спектры жёсткого рентгеновского излучения плазмы, формируемой на поверхности железной мишени лазерным импульсом длительностью ~ 40 фс (а,б) и ~ 350 фс (в,г) с высоким (10^{-8} , тип контраста «1») и низким (10^{-5} , тип контраста «3») уровнем усиленной спонтанной люминесценции.

Эффекта появления в плазме нового компонента не наблюдается при удлинении импульса с низким уровнем усиленной спонтанной люминесценции

(около 10^{-8} , тип «1» и «2»), а также с использованием мишени с высоким порогом пробоя (плавленого кварца), когда размер преплазмы оказывается существенно меньше (не более нескольких длин волн). Средняя энергия горячих электронов в обоих случаях существенно понижается (до нескольких десятков кэВ) согласно уменьшению интенсивности, что говорит об определяющей роли плотного преплазменного слоя и его размеров в процессе ускорения электронов, Рис.6(в), Таблица 1.

Теневое фотографирование плазмы, формируемой под воздействием короткого лазерного импульса, показало, что размер и форма облака существенным образом зависят от типа используемых мишеней, что может объяснять полученные результаты (Рис.7). Так на поверхности железной мишени после воздействия импульса формируется плотное облако, которое на временах свыше 10 нс сильно рассеивается, достигая продольного размера около 50 мкм. В случае свинцовой мишени плотность плазменного факела остаётся высокой даже на сравнительно больших задержках в 10 нс и более, что говорит о более интенсивном выносе вещества с поверхности, по сравнению с железной мишенью. Продольный размер составляет около 25 мкм. В то же время в случае диэлектрической мишени на временах нескольких наносекунд после воздействия наблюдается плотное облако существенно меньшего размера (около 10-15 мкм), которое практически полностью рассеивается на временах свыше 10 нс.

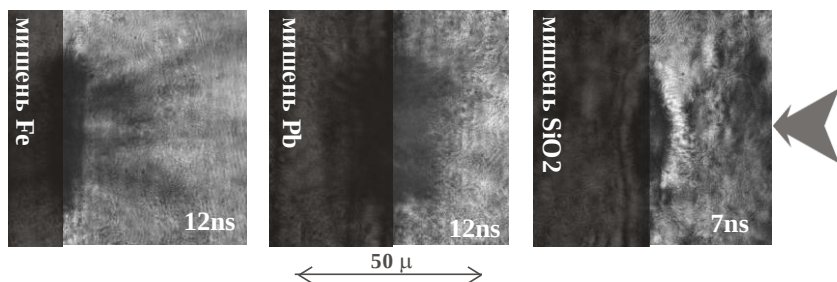


Рис.7. Теневые фотографии облака плазмы спустя несколько наносекунд после воздействия короткого импульса на поверхность различных мишеней. Серая стрелка указывает направление распространения греющего импульса.

Численное PIC моделирование лазерно-плазменного взаимодействия с использованием кода Mandor, проведённое А.В. Брантовым, показало, что наличие преплазменного слоя сложной формы (резкой плотной области у границы мишени и протяжённого облака субкритической плотности) над

поверхностью мишени приводит к генерации электронов с аномально высокой энергией в области плазмы с плотностью в четверть критической. При этом важно отметить, что наиболее эффективная раскачка волны электронов происходит, когда точка с четверть критической плотностью оказывается вблизи области перехода от протяжённого субкритического слоя к крутому плотному профилю у границы, где пересекаются падающая и отражённая от резкой границы части лазерного импульса. Удлинение импульса с 50 до 300 фс при интенсивности около 10^{18} Вт/см² приводит к росту средней энергии наиболее высокоэнергетичного электронного компонента, что говорит о зависимости энергии частиц не только от интенсивности, но и от длительности импульса.

Основные результаты Четвёртой главы представлены в работах [5,10,12,16-18].

В **Заключении** приведены основные результаты и выводы диссертационной работы:

Разработана методика оценки параметров плазмы, включающая в себя экспериментальное измерение спектра жёсткого рентгеновского излучения плазмы наиболее распространёнными сцинтилляционными детекторами на кристалле NaI и численное восстановление исходного спектра плазмы методом Монте-Карло с учётом физических процессов взаимодействия рентгеновских квантов с веществом, приводящих к искажениям формы измеряемого спектра относительно исходного спектра плазмы. Методика позволяет восстановить форму исходного спектра плазмы по измеренному и получить оценки на средние энергии горячих электронных компонентов плазмы.

По основным экспериментальным результатам диссертационной работы можно сделать следующие выводы:

1. Обнаружено существенное влияние предимпульса на наносекундном масштабе времени на ускорение электронов и генерацию жесткого рентгеновского излучения в плазме, создаваемой на поверхности мишени в жидкой фазе:

1) в отсутствии предимпульса параметры плазмы расплавленного галлия схожи с свойствами плазмы, создаваемой на поверхности твердотельной мишени. Энергия горячих электронов в плазме составляет 18 ± 2 кэВ, что находится в разумном согласии с теоретической оценкой для механизма резонансного поглощения в слое с критической плотностью;

2) при введении предимпульса, опережающего основной импульс на несколько наносекунд и имеющего энергию от десяти до нескольких сотен мкДж, что соответствует его интенсивности от 10^{14} до 5×10^{15} Вт/см², наблюдается возрастание средней энергии быстрых электронов в плазме, достигающей

максимума в 75 кэВ при энергии предимпульса ~ 30 мкДж (и его интенсивности около 10^{15} Вт/см²), и увеличение выхода жёсткого рентгеновского излучения в диапазон >3 кэВ более чем в 60 раз по сравнению с случаем без предимпульса;

3) параметры плазмы слабо зависят от направления линейной поляризации лазерного излучения. При наименьшей амплитуде предимпульса поглощение энергии при s-поляризации вероятно обеспечивается за счёт формирования небольшого квази-стабильного кратера на поверхности мишени, в то время как при повышении энергии предимпульса ускорение электронов при s-поляризации обуславливается сильным искажением поверхности мишени;

4) воздействие на мишень из расплавленного галлия фемтосекундного импульса с энергией от 30 до 200 мкДж и интенсивностью от 1.5×10^{15} до 10^{16} Вт/см² ведёт к формированию на поверхности мишени повторяющихся от выстрела к выстрелу микроструктур в виде плотных струй, вылетающих от поверхности, длина которых в зависимости от энергии импульса достигает 50 мкм, а время существования от момента формирования до размытия – около 15 нс;

5) согласно данным численного моделирования методом PIC-кода, при взаимодействии лазерного импульса с плазменными структурами в виде плотных струй микромасштаба наблюдаются эффекты усиления локального электрического поля на их поверхности, что приводит к стохастическому характеру движения электронов вдоль структур и, как следствие, более эффективному набору энергии частицами;

2. Показана ключевая роль преплазменного слоя в ускорении электронов в плазме, создаваемой лазерным импульсом субрелятивистской на поверхности твердотельных мишеней:

1) на резкой границе металлической мишени с характерным пространственным масштабом разлёта облака преплазмы менее одной длины волны, происходит генерация быстрых электронов с средними энергиями 95 и 270 кэВ при интенсивностях лазерного импульса 7×10^{17} и 20×10^{17} Вт/см², соответственно. Близость полученных оценок и теоретических ожиданий в 120 и 300 кэВ, позволяют предположить, что основным механизмом генерации быстрых электронов в данных условиях является пондеромоторное ускорение и $\vec{j} \times \vec{B}$ нагрев;

2) воздействие на мишень импульса с высоким уровнем усиленной спонтанной люминесценции (около 10^{-5}) приводит к формированию над поверхностью металлических (железо и свинец) мишеней протяжённой преплазмы с продольным размером до нескольких десятков длин волн. При распространении в облаке преплазмы лазерный импульс может испытывать самофокусировку, повышающую его пиковую интенсивность. В области преплазмы с близкой к

критической плотностью может идти возбуждение релятивистских механизмов генерации электронов, таких как ускорение в плазменной волне, образующейся при параметрическом рассеянии. Так оценка на среднюю энергию быстрых электронов для железной мишени составила 175 кэВ при интенсивности 7×10^{17} Вт/см², а для свинцовой мишени – 560 кэВ при 10^{18} Вт/см²;

3) увеличение длительности импульса при сохранении его энергии ведёт к появлению в плазме, создаваемой на поверхности мишени с протяжённым преплазменным слоем высоким уровнем усиленной спонтанной люминесценции (около 10^{-5}) импульса, нового быстрого электронного компонента. Так, при длительности 350 фс и максимальной интенсивности $\sim 10^{17}$ Вт/см² средняя энергия горячих электронов возрастает до 380 и 870 кэВ для мишеней из железа и свинца, соответственно. Эффект не зависит от знака фазовой модуляции лазерного импульса, возникающей при его растяжении во времени;

4) существенным является наличие горячей преплазмы с плотностью близкой к критической. Возрастания энергии электронов не наблюдается для длинного преплазменного слоя низкой плотности, формируемого коротким предимпульсом, опережающим основной импульс на несколько наносекунд;

5) эффекта появления в плазме нового электронного компонента не происходит при удлинении импульса (при сохранении его энергии) с высоким контрастом, а также с использованием мишени с высоким порогом пробоя, когда продольный размер преплазмы оказывается существенно меньше (не более нескольких длин волн). Средняя энергия горячих электронов в обоих случаях существенно понижается (до нескольких десятков кэВ) согласно уменьшению интенсивности;

6) согласно данным теневого фотографирования облака плазмы, формируемого коротким импульсом, размер и форма облака существенным образом зависят от типа используемых мишеней. Так, на поверхности железной мишени спустя 12 нс после воздействия импульса наблюдается полупрозрачное облако с продольным размером около 50 мкм. В случае свинцовой мишени плотность плазменного факела оказывается выше, чем на железной, что говорит о более интенсивном выносе вещества с поверхности, но продольный размер несколько меньше – около 25 мкм. В то же время в случае диэлектрической мишени продольный размер облака оказывается существенно меньше (около 10-15 мкм), а сам факел практически полностью рассеивается на временах свыше 10 нс;

7) численное моделирование лазерно-плазменного взаимодействия показало, что в условиях длинного преплазменного слоя субкритической плотности происходит более эффективное ускорение электронов в области с плотностью в четверть критической. Сильное влияние на генерацию частиц оказывает профиль сложной формы, состоящий из двух наклонов. Нахождение точки перегиба в

области плотности $n_{cr}/4$ может приводить к действию новый механизм ускорения электронов до аномально высоких энергий (свыше 1 МэВ).

Публикации, в которых представлены результаты диссертационной работы:

[1] В.В. Большаков, А.А. Воробьев, Д.С. Урюпина, К.А. Иванов, Н. Моршедиан, Р.В. Волков, А.Б. Савельев-Трофимов, “Особенности генерации горячих электронов в плотной плазме при воздействии фемтосекундным лазерным импульсом субрелятивистской интенсивности” // Квантовая Электроника, **39**, 669-674 (2009);

[2] К.А. Иванов, Д.С. Урюпина, Н. Моршедиан, Р.В. Волков, А.Б. Савельев, “Ускорение тяжелых многозарядовых ионов при воздействии фемтосекундного лазерного излучения субрелятивистской интенсивности на поверхность расплавленного металла” // Физика Плазмы, **36**, 115-120 (2010);

[3] K.A. Ivanov, D.S. Uryupina, R.V. Volkov, A.P. Shkurinov, I.A. Ozheredov, A.A. Paskhalov, N.V. Eremin and A.B. Savel'ev, “High repetition rate laser-driven Ka X-ray source utilizing melted metal target” // Nucl. Instrum. Meth. A, **653**, 58-61 (2011);

[4] D.S. Uryupina, K.A. Ivanov, A.V. Brantov, A.B. Savel'ev, V.Yu. Bychenkov, M.E. Povarnitsyn, R.V. Volkov and V.T. Tikhonchuk, “Femtosecond laser-plasma interaction with prepulse-generated liquid metal microjets” // Phys. Plasmas, **19**, 013104 (2012);

[5] K.A. Ivanov, S.A. Shulyapov, A.A. Turinge, A.V. Brantov, D.S. Uryupina, R.V. Volkov, A.V. Rusakov, R.M. Djilkibaev, V.G. Nedorezov, V.Yu. Bychenkov and A.B. Savel'ev, “X-ray diagnostics of ultrashort laser-driven plasma: experiment and simulations” // Contr. Plasma Phys., **53**, 116-121 (2013);

[6] Ivanov K.A., Uryupina D.S., Morshedean N., Volkov R.V. and Savel'ev A.B. «Control of plasma parameters created onto the melted metal by femtosecond laser pulse with nanosecond prepulse» // Тезисы 13-й международной конференции Laser Optics (LO-2008), 23 – 28 июня, 2008, Санкт-Петербург, Россия, с.41;

[7] К.А.Иванов «Управление параметрами источника жесткого рентгеновского излучения, создаваемого мощным лазерным излучением с высокой частотой повторения импульсов на поверхности расплавленного галлия» // Сборник тезисов XII Школы молодых учёных «Актуальные проблемы физики» и II Школы-семинара «Инновационные аспекты фундаментальных исследований», 23 – 27 ноября, 2008, Москва, с.5.;

[8] К.А.Иванов «Источник жесткого рентгеновского излучения с высокой частотой повторения импульсов, создаваемый мощным фемтосекундным

лазерным излучением на поверхности расплавленного галлия» // Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов 2009», Секция «Физика», Издательство МГУ, май 2009, Москва, с.8;

[9] Ivanov K.A., Uryupina D.S., Volkov R.V., Savel'ev A.B., Ozheredov I.A., Shkurinov A.P. «Stable laser-plasma picosecond kHz x-ray source using melted metal target» // Сборник тезисов 17-й международной конференции Advanced Laser Technologies (ALT'09), 26 сентября – 1 октября, 2009, Анталия, Турция, с.155;

[10] Иванов К.А., Сидоров И.А., Урюпина Д.С., Воробьёв А.А., Большаков В.В., Волков Р.В., Савельев А.Б. «Генерация жесткого рентгеновского излучения при взаимодействии субгераваттного лазерного излучения с поверхностью твердотельной мишени» // Программа и аннотации докладов 3-й Высшей Лазерной Школы «Современные проблемы лазерной физики», 9-11 ноября, 2009, Москва, с.11;

[11] K.A. Ivanov, D.S. Uryupina, R.V. Volkov, A.B. Savel'ev, A.V. Brantov, V.Yu. Bychenkov, A.A. Paskhalov, N.V. Eremin «Enhancement of hard x-ray yield at interaction of sub-relativistic laser pulse with structured by short prepulse surface of melted gallium target» // Тезисы 14-й международной конференции Laser Optics (LO-2010), 28 июня – 2 июля, 2010, Санкт-Петербург, Россия, с.23;

[12] K.A. Ivanov, D.S. Uryupina, V.V. Bolshakov, R.V. Volkov, A.B. Savel'ev, A.A. Vorobyev, I.A. Sidorov, A.V. Brantov, V.Yu. Bychenkov, D. Romanov, A.A. Paskhalov, N.V. Eremin «Fast electrons generation by sub-relativistic laser pulse acting onto plasma with varied density scalelength» // Труды 4-й международной конференции Frontiers of Nonlinear Physics (FNP 2010), 13 – 20 июля, 2010, Нижний Новгород – Санкт-Петербург, Россия, с. 173-174;

[13] Иванов К.А., Урюпина Д.С., Волков Р.В., Савельев А.Б., Брантов А.В., Быченков В.Ю., Ерёмин Н.В., Пасхалов А.А. «Взаимодействие лазерного импульса суб-релятивистской интенсивности с микроструктурированной поверхностью жидкого металла» // Тезисы докладов 8-го Российского Симпозиума Проблемы Физики Ультракоротких Процессов в Сильнонеравновесных Средах, 23 июля – 1 августа, 2010, Новый Афон, Абхазия, с.19;

[14] K.A. Ivanov, D.S. Uryupina, R.V. Volkov, A.B. Savel'ev, A.V. Brantov, V.Yu. Bychenkov, A.A. Paskhalov, N.V. Eremin «Enhanced femtosecond laser-plasma x-ray source utilizing microstructured liquid metal target» // Программа 4-й международной конференции Superstrong Fields in Plasmas 2010, 3 – 9 октября, 2010, Варенна, Италия;

[15] K.A. Ivanov, D.S. Uryupina, R.V. Volkov, A.V. Brantov, V.Yu. Bychenkov, M.E.Povarnitsyn, A.B. Savel'ev “Microstructurized melted metal target for X-ray

source enhancement” // Тезисы международной школы молодых ученых 68th Scottish Universities Summer School in Physics, 14-26 августа, 2011, Глазго, Шотландия, с.21;

[16] Savel'ev A.B., Ivanov K.A., Shulyapov S.A., Lar'kin A.S., Uryupina D.S., Ksenofontov P.A., Brantov A.V., Bochkarev S. Bychenkov V.Yu. “Pre-pulse effect onto relativistic femtosecond laser plasma interaction” // Программа 11-го симпозиума “Complex systems of charged particles and their interaction with electromagnetic radiation”, 11-12 апреля, 2013, Москва, Россия, с.9;

[17] Иванов К.А., Шуляпов С.А., Урюпина Д.С., Ларькин А.С., Савельев-Трофимов А.Б., Брантов А.В., Быченков В.Ю., Русаков А.В., Лапик А.М., Недорезов В.Г. «Ускорение электронов при взаимодействии лазерного импульса субрелятивистской интенсивности с пространственно-неоднородной плазмой» // Сборник тезисов докладов научной конференции Ломоносовские Чтения 2013, секция «Физика», 15-24 апреля, 2013, Москва, Россия, с.28-30;

[18] D.S. Uryupina, A.S. Lar'kin, K.A. Ivanov, S.A. Shulyapov, R.V. Volkov, A.B. Savel'ev, S.A. Pikuz, A.V. Brantov, V.Yu Bychenkov, C. Fourment, F. Dorchies, B. Chimier, V.T. Tikhonchuk, F. Gobet, M. Tarsien, D. Denis-Petit, F. Hannachi, T. Bonnet, M. Versteegen, “Prepulse induced microstructured plasma with melted and solid targets: formation, properties & prospects to relativistic laser-plasma interaction” // Программа конференции SPIE Optics and Optoelectronics, 15-18 апреля, 2013, Прага, Чехия, с.39.