

На правах рукописи

МОРШЕДИАН НАДЕР

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТИ РАСПЛАВЛЕННЫХ
МЕТАЛЛОВ СВЕРХИНТЕНСИВНЫМ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ
ИЗЛУЧЕНИЕМ

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2008

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
доцент Савельев-Трофимов Андрей Борисович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Романовский Михаил Юрьевич

кандидат физико-математических наук
Ерёмин Николай Владимирович

Ведущая организация: Объединенный институт
высоких температур РАН

Защита состоится “19” июня 2008 года в __18:30__ часов 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 диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан “_15_” мая 2008 года.

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

Т.М. Ильинова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Создание лазерных систем сверхсильного светового поля «настоельного типа», генерирующих импульсы длительностью от 20 фс до 1 пс с энергией от единиц миллиджоулей до нескольких джоулей открыло новые перспективы как для фундаментальных исследований (релятивистская и аттосекундная лазерная физика, нелинейная квантовая электродинамика, ядерная физика), так и в области прикладных наук.

Сверхинтенсивное лазерное излучение позволяет получать сверхсильное световое поле (при интенсивности $I \geq 10^{16}$ Вт/см² напряженность светового поля превышает напряженность внутриатомного в атоме водорода $E_a > 10^9$ В/см). В таком режиме взаимодействия оказывается возможным изучать фундаментальные свойства вещества в сильно неравновесных, экстремальных состояниях, проводить ядерно-физические эксперименты, а также достичь субпико- и аттосекундного временного разрешения при исследовании временной динамики процессов. На данный момент существенный интерес для практических применений представляет диапазон интенсивностей от 10^{16} Вт/см² до 10^{17} Вт/см². Одной из важных и перспективных задач в данном контексте исследований является возможность создания нового поколения источников излучения сверхкороткой длительности в ВУФ, рентгеновском и гамма-диапазонах спектра.

Лазерно-плазменные источники рентгеновского и корпускулярного излучения в настоящее время активно исследуются с точки зрения возможности их применения в самых различных задачах, требующих импульсного излучения с малой длительностью и/или высокой спектральной яркостью. К таким задачам можно отнести диагностику быстротекающих процессов рентгеновскими методами, получение изображений в жестком рентгеновском диапазоне для медицины и материаловедения, ионную имплантацию, создание «затравочных» пучков для электронных и ионных ускорителей, импульсную нейтронную диагностику и т.д.

Физические процессы, сопровождающие поглощение энергии веществом при воздействии на него сверхкоротким лазерным импульсом, приводят к формированию плазмы с уникальными характеристиками. Уже при интенсивностях на уровне $10^{16} - 10^{17}$ Вт/см² помимо столкновительных механизмов поглощения световой энергии, формирующих тепловой электронный компонент плазмы проявляются дополнительные бесстолкновительные механизмы, формирующие так называемый, горячий электронный компонент со средней энергией, на один - два порядка превосходящей среднюю энергию тепловых электронов. Именно горячий электронный компонент представляет наибольший интерес для исследователей, поскольку он ответственен за генерацию жесткого

рентгеновского излучения, появление быстрых протонов, высокозаряженных ионов и другие эффекты.

Контраст фемтосекундного лазерного импульса, т.е. наличие коротких предимпульсов, либо протяженного пьедестала, существенным образом влияет как на режим формирования плазмы в целом, так и на генерацию горячего электронного компонента плазмы. В частности, при изменении контраста может быть достигнута эффективная оптимизация рентгеновского выхода из мишени и средней энергии горячих электронов. Эффективность процессов, приводящих к генерации горячих электронов также зависит от направления поляризации: генерация горячих электронов в нерелятивистском режиме взаимодействия возможна только при р-поляризации оптического излучения относительно поверхности плоской мишени.

Традиционно в экспериментах по формированию плазмы фемтосекундным лазерным излучением используются твердотельные мишени, пучки атомных кластеров, микрокапли и струи жидкости. Кроме того, в качестве мишени может быть использована поверхность жидкости. Такой вариант мишени представляет существенный интерес, поскольку поверхность жидкости способна восстанавливаться после лазерного воздействия, исключая тем самым необходимость непрерывного смещения мишени. Это открывает интересные перспективы при создании плазменных источников с высокой частотой следования импульсов вплоть до нескольких кГц.

В выполненных ранее работах была показана принципиальная возможность создания рентгеновского источника с использованием мишени в виде жидкого (расплавленного) металла, продемонстрирована его высокая стабильность на протяжении нескольких часов непрерывной работы. В тоже время, вопрос о возможности оптимизации параметров такого источника не исследовался. В первую очередь, решение этого вопроса связано с выяснением физических особенностей во взаимодействии фемтосекундного лазерного импульса с жидкой мишенью, в том числе роль контраста импульса, его поляризации и др.

Таким образом, целью настоящей диссертационной работы явилось экспериментальное выявление особенностей взаимодействия фемтосекундного лазерного импульса с интенсивностью до 10^{17} Вт/см² с поверхностью различных расплавленных легкоплавких металлов. В рамках настоящей диссертации проведен комплекс исследований плазмы, создаваемой фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью 10^{16} – 10^{17} Вт/см² и частотой следования импульсов 10 Гц, с применением рентгеновских, ионных и оптических методов исследования. Основное внимание уделено особенностям формирования горячего электронного компонента плазмы, ответственного за генерацию жесткого рентгеновского излучения и появление быстрого ионного компонента, при изменении

ключевых параметров, влияющих на горячий электронный компонент: контраст фемтосекундного лазерного излучения и поляризация этого излучения. В качестве жидкой мишени в работе используются легкоплавкие металлы (галлий, индий, висмут) при температурах, превышающих температуру плавления.

Научная новизна

1. Экспериментально обнаружен ряд особенностей во взаимодействии сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения (энергия импульса 1 мДж, длительность импульса 50 фс, расчетная интенсивность до 10^{17} Вт/см²) с поверхностью расплавленных металлов галлия, индия и висмута:

- выход жесткого рентгеновского излучения и средняя энергия горячих электронов существенно возрастают при ухудшении наносекундного контраста от 4×10^6 до 100 и ниже, причем получаемые величины существенно превышают оценки, выполненные в рамках механизма резонансного поглощения лазерного излучения. Максимальные значения этих величин для мишени галлия при температуре свыше 400 К достигаются при контрасте 30-70;
- напротив, энергия на единицу заряда быстрых и медленных ионов, зарегистрированных вдоль нормали к поверхности мишени, уменьшается с ухудшением контраста лазерного излучения;
- эффективность генерации К-альфа излучения галлия (10.2 кэВ) достигает максимума в 2.5×10^{-4} при том же значении контраста, что и выход жесткого рентгеновского излучения в целом;
- для s- и p- поляризованного излучения выход тормозного рентгеновского и К-альфа излучений, средняя энергия горячих электронов и ионные энергетические спектры для контраста ниже 160 в пределах ошибки измерения совпадают.

2. Экспериментально продемонстрирована возможность получения тяжелых многозарядных ионов галлия и индия с энергией свыше 1 МэВ при взаимодействии с поверхностью расплавленного металла фемтосекундного лазерного излучения интенсивностью порядка 5×10^{16} Вт/см² и контрастом по интенсивности свыше 10^6 .

Научная и практическая ценность

Использование в качестве мишени для формирования горячей плотной плазмы свободной поверхности расплавленных металлов открывает возможность создания источников рентгеновского излучения, быстрых ионов, γ -квантов, нейтронов и т.п. с высокой частотой повторения импульсов. Самообновление поверхности мишени позволяет использовать поверхность жидкости многократно (так как на ней не образуется кратеров), что значительно увеличивает ресурс по количеству выстрелов.

Развитая методика оптического зондирования одним лазерным пучком обеспечивает информацию о временной динамике расширения плазменного факела (методом теневого фотографирования).

В целом подходы и методики, развитые в диссертационной работе, могут использоваться для создания различных источников плазменных излучений и частиц с высокой частотой повторения импульсов.

Защищаемые положения

1. Возможно эффективное управление параметрами плазмы (средняя энергия горячих электронов, эффективность генерации жесткого рентгеновского излучения с непрерывным и линейчатым спектром, энергетический спектр быстрых и медленных ионов), создаваемой фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью 10^{16} – 10^{17} Вт/см² на поверхности расплавленного металла, если во временной структуре этого излучения содержится предимпульс, опережающий основной импульс на 13 нс и имеющий амплитуду в 30-400 раз меньшую, чем основной импульс.

2. Параметры плазмы, формируемой на поверхности расплавленного легкоплавкого металла (галлий, индий, висмут) фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью 10^{16} – 10^{17} Вт/см² при частоте следования импульсов 10 Гц, слабо зависят от поляризации лазерного излучения. Так, эффективность преобразования по энергии в жесткий рентгеновский диапазон спектра, средняя энергия горячих электронов плазмы и эффективность генерации К-альфа излучения (галлия) совпадают в пределах ошибки измерения при s- и p- поляризации лазерного излучения и наносекундном контрасте по интенсивности менее 400.

3. Взаимодействие фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью порядка 5×10^{16} Вт/см² при частоте следования импульсов 10 Гц и контрасте по интенсивности свыше 10^6 с поверхностью расплавленного металла, имеющего температуру свыше 400 К, приводит к формированию пучка быстрых тяжелых многозарядных ионов основного материала мишени с энергией, превышающей 1 МэВ.

Апробация работы и публикации

Основные результаты исследований, представленных в диссертации, докладывались на следующих научных конференциях: IV и V Международный научный семинар «Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах» (Москва, 2007, 2008), III Международная конференция «Перспективы нелинейной физики» (Нижний Новгород, 2007), Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике ICONO-2007 (Минск, 2007), 5-ый семинар «Комплексные системы заряженных частиц и их взаимодействие с электромагнитным излучением» (Москва, 2007).

По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, в том числе 2 статьи в отечественных научных журналах (1 журнал из списка ВАК России) и 5 тезисов докладов.

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены при непосредственном участии автора. Автор внес важный вклад в постановку и проведение экспериментов, обработку экспериментальных данных, а также интерпретацию полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения. Работа изложена на 115 страницах, включает 43 рисунка, 4 таблицы и список литературы (общее число ссылок 160).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во Введении (*раздел 1*) сформулированы цели и задачи работы. Кратко изложено содержание диссертации.

Во *втором разделе* диссертационной работы представлен обзор работ, связанных с взаимодействием сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения с плотными мишенями. Рассмотрены основные физические процессы, протекающие при взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью 10^{16} - 10^{17} Вт/см² с мишенями, плотность которых слабо отличается от твердотельной.

При описании физической картины такого взаимодействия в *параграфе 2.1.* основное внимание уделено процессам, приводящим к генерации горячих электронов. Горячий электронный компонент проявляется в виде «хвоста» в высокоэнергетичной части спектра электронов. Основным параметром, определяющим преимущественную роль того или иного бесстолкновительного механизма генерации горячих электронов, является пространственный масштаб градиента электронной плотности.

Ускорение ионов в такой плазме (*параграф 2.2*) происходит за счет амбиполярного поля, возникающего вследствие разделения зарядов на границе плазма-вакуум. В случае разлета плазмы, содержащей ионы одного типа, энергетический спектр ионов будет соответствовать энергетическому спектру электронов. Если в плазме присутствуют горячие и тепловые электроны, то появятся быстрый и медленный ионные компоненты.

В *параграфе 2.3.* проведен обзор работ по формированию лазерно-плазменного источника с использованием фемтосекундного лазерного излучения с использованием плотных мишеней различного типа. Одной из ключевых проблем при создании такого рода источников является необходимость быстрой смены области взаимодействия перед каждым лазерным импульсом. Наиболее простой тип мишени - мишень в виде плоской пластины, не обеспечивает возможности долговременной работы. Для преодоления такого рода проблем

вместо плоских пластин в качестве мишени используются быстро вращающиеся диски, а также протягиваемые проволоки и ленты. Помимо твердых веществ в качестве мишени могут быть использованы вещества в жидкой фазе, также имеющие плотность, близкую к твердотельной. Наиболее простой и очевидной формой такой мишени является жидкость, налитая в кювету. Однако публикаций по использованию мишеней такого рода мало.

При определенных условиях воздействие фемтосекундного лазерного импульса (предымпулса) на поверхности жидкости приводит к формированию микрокапель, взаимодействие с которыми последующих лазерных импульсов имеет важные особенности, приводящие, в частности, к существенному увеличению эффективности генерации жесткого рентгеновского излучения. Завершается *раздел 2* формулировкой основных задач, решаемых в рамках настоящей диссертации.

В *третьем разделе* работы проведено описание основных частей использованной экспериментальной установки: фемтосекундного лазера на сапфире с титаном, созданной камеры взаимодействия для исследования взаимодействия лазерного излучения с поверхностью жидкостей и расплавленных металлов, использованных методик регистрации жесткого рентгеновского излучения плазмы и ионных время-пролетных сигналов, а также схемы оптического зондирования плазменного факела. В *параграфе 3.1.* приведены основные параметры излучения, генерируемого лазерной системой на сапфире с титаном, и схемы их измерения. Лазерная система, которая используется в наших экспериментах, генерирует импульсное излучение длительностью 50 фс, энергией до 25 мДж и наносекундным контрастом по интенсивности до 4×10^6 . Фокусировка данного излучения с помощью безабберационного объектива возможна при энергии в импульсе до 2 мДж, что обеспечивает интенсивность на мишени вплоть до 10^{17} Вт/см².

Во временной структуре излучения отсутствуют предымпулсы на пикосекундном масштабе времен с амплитудой более 10^{-5} от амплитуды основного импульса. Контраст системы на наносекундном масштабе определяется, в первую очередь, «просачиванием» излучения предыдущего импульса из цуга генерации регенеративного усилителя через поляризационную развязку. Контраст по энергии для данного предымпулса составляет от 10 до 10^6 в зависимости от точности взаимной юстировки поляризаторов и нелинейных кристаллов в ячейках Поккельса.

Параграф 3.2 посвящен описанию схемы эксперимента, созданной нами камеры взаимодействия и используемых методик исследования плазмы (рис.1). Излучение фемтосекундной лазерной системы фокусировалось на мишень безабберационным объективом с фокусным расстоянием 6 см через одно из окон вакуумной камеры. Угол падения излучения на мишень составлял 45°. Поворот вектора поляризации осуществлялся

поворотом полуволновой пластинки нулевого порядка вокруг оптической оси. Вакуумная камера откачивалась с помощью форвакуумного насоса до давления 10^{-2} Торр. В центре камеры горизонтально устанавливалась мишень, представлявшая собой кювету из нержавеющей стали с медным резистивным нагревателем, в которую помещался нагреваемый легкоплавкий металл. Температура металла изменялась с помощью выбора напряжения на нагревателе от переменного трансформатора ЛАТР и измерялась в течение всего эксперимента с помощью термопары, погруженной в металл. Максимальная температура металла составляла 600°K .

Измерение характеристик плазмы проводилось по регистрации жесткого рентгеновского излучения и ионных времяпролетных сигналов, а также методом оптического зондирования

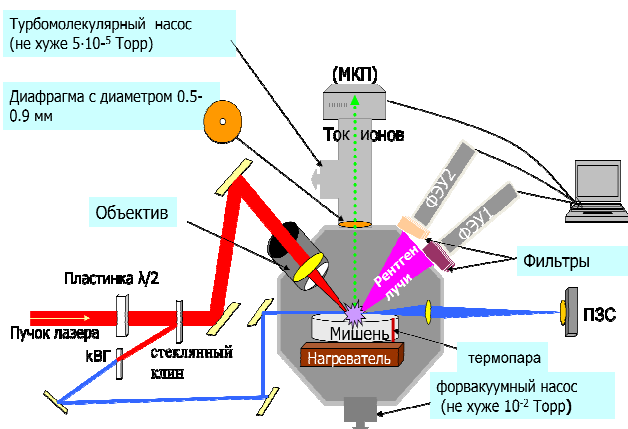


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

вдоль поверхности мишени. Рентгеновское излучение регистрировалось двумя NaI детекторами. Наборы фильтров из фольг алюминия, бериллия и тантала, расположенные перед входными окнами детекторов, обеспечивали измерение выхода жесткого рентгеновского излучения в различные спектральные диапазоны. Отметим, что в регистрируемом

спектральном диапазоне рентгеновское излучение обусловлено именно горячими электронами, вклад в спектральную функцию от тепловых электронов пренебрежимо мал.

Оценка на среднюю энергию E_h горячего электронного компонента плазмы производилась по разработанной в лаборатории методике. Измерения эффективности генерации β тормозного рентгеновского излучения проводятся одновременно в два различных спектральных диапазона. Затем, исходя из известного спектра свечения лазерной плазмы и пропускания фильтров, можно оценить «температуру» горячих электронов плазмы.

Измерение ионных токов производилось с помощью времяпролетного спектрометра с микро-канальной пластиной шевронного типа, пристыкованного к камере взаимодействия в вертикальном положении над мишенью. Была реализована схема дифференциальной откачки ионного спектрометра: объем камеры взаимодействия отделялся от спектрометра с помощью вакуумно-плотной диафрагмы с отверстием 0.5 мм, а спектрометр прокачивался дополнительным турбомолекулярным насосом ТМН-150. Остаточный вакуум в объеме спектрометра был не хуже 5×10^{-5} Торр, а остаточный вакуум в камере взаимодействия при этом не изменялся. Расстояние от мишени до отверстия в диафрагме составляло 10 см, а от

этого отверстия до МКП – 20, либо 110 см в зависимости от варианта стыковки спектрометра. Регистрация ионных токов осуществлялась с помощью платы быстрого цифрового осциллографа с частотой оцифровки 2 ГГц, встраиваемой в ПЭВМ.

Поскольку контраст лазерного излучения является одним из основных параметров, влияющих на характеристики формирующейся плазмы, нами была реализована методика оптического зондирования плазменного факела. Оптическое излучение с энергией порядка 1 мДж, делилось на два пучка с помощью стеклянного клина. Небольшая часть излучения, отраженная от входной поверхности пластинки, фокусировалась на мишень. Основная часть излучения направлялась на кристалл KDP для генерации второй гармоники, задерживалась с помощью линии задержки (от 0 до 15 нс шагом порядка 1 нс) и далее фокусировалась вдоль поверхности мишени с таким расчетом, чтобы перетяжка этого пучка совпадала с областью плазмы. Изображение на длине волны 400 нм переносилось с увеличением порядка 20х на ПЗС матрицу, снабженную светофильтрами для подавления засветки на длине волны 800 нм, с помощью объектива с фокусным расстоянием 6 см (пространственное разрешение оптической системы переноса изображения ~3 мкм).

Проведенные оценки показывают, что большинство легкоплавких металлов могут быть использованы в экспериментах по взаимодействию сверхинтенсивного лазерного излучения с поверхностью расплавленного металла. В качестве основной мишени был выбран галлий, выгодно отличающийся низкой температурой плавления и малым давлением насыщенных паров. Поскольку для целого ряда приложений представляет интерес использование мишеней с различными атомными номерами, были проведены сравнительные исследования для индия и висмута.

В разделе 4 приведены оригинальные экспериментальные результаты по характеристике горячего электронного компонента плазмы по рентгеновскому свечению плазмы. Эксперименты выполнены для различных мишеней при варьировании контраста и поляризации фемтосекундного лазерного излучения.

В параграфе 4.1 приведены результаты экспериментов для мишеней из галлия, индия и висмута при температуре около 500 К, полученные при контрастах лазерного излучения около 200 и 20 для р-поляризованного лазерного излучения с энергией порядка 850 мкДж. Анализ этих результатов показывает, что при ухудшении контраста наблюдается рост эффективности β , а также средней энергии E_h . Кроме того, наблюдаются необычные изменения в гистограммах распределения этих величин по реализациям: при ухудшении контраста появляется «хвост» распределения со стороны больших значений величин, причем число таких реализаций достаточно существенно. Так, появляется большое число реализаций (свыше 10%) со средней энергией, в 2-4 раза превышающей среднее значение E_h . Это явно

указывает на проявление дополнительных механизмов ускорения электронов при плохом контрасте лазерного излучения.

В связи с этим в *параграфе 4.2.* проведено исследование влияния контраста лазерного излучения и его поляризации на исследуемые параметры плазмы. Контраст излучения изменялся от 10 до 10^6 . В первой серии экспериментов проводилось измерение β в два спектральных диапазона и оценка E_h при двух линейных поляризациях лазерного излучения (p и s) и разных его контрастах. Сводные результаты представлены на рисунке 2. Величины β и E_h возрастают с ухудшением контраста и достигают своих максимальных значений при контрасте порядка 30-40. В тоже время, эти величины слабо зависят от поляризации лазерного излучения. При высоком контрасте реализации сконцентрированы вблизи одного среднего значения, а сама гистограмма почти симметрична относительно этого значения. В случае p-поляризации среднее значение $E_h \sim 8400 \pm 100$ эВ немного превышает соответствующую величину для s-поляризованного излучения 7900 ± 100 эВ. При ухудшении контраста до 53 распределение становится несимметричным с длинным «хвостом» в область больших значений, а среднее значение $E_h > 50$ кэВ. Дальнейшее ухудшение контраста до 14 приводит к общему сдвигу распределения в область меньших значений при существенном уменьшении числа реализаций с аномально высокой средней энергией. Аналогичные результаты были получены также для мишени из индия. Основное отличие состоит лишь в небольшом изменении контраста, при котором наблюдается максимальные β и E_h , что может быть связано с различиями в физико-химических параметрах галлия и индия.

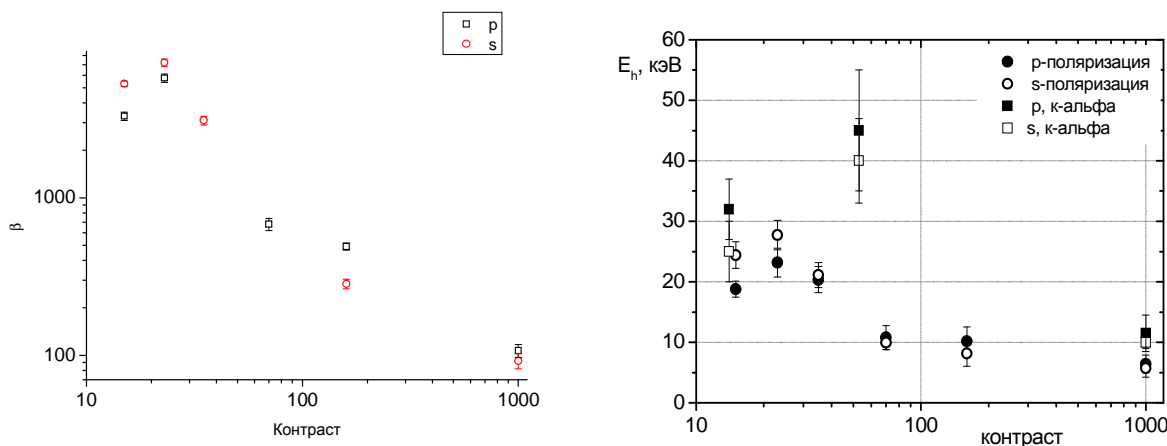


Рис. 2. Зависимость β (а) и E_h , оцененная по двум методикам, (б) от контраста лазерного излучения при двух его состояниях поляризации. Здесь и далее контраст 10^6 условно показан значением 1000.

Галлиевая мишень обладает яркой характеристической К-альфа линией в регистрируемой области энергетического спектра рентгеновского излучения. Для исследования влияния К-альфа излучения на оценку E_h и оценку эффективности генерации этой линии в наших условиях был использован метод фильтров с применением ряда

фильтров из алюминия с последовательно нарастающей оптической толщиной. В отсутствие К-альфа излучения галлия зависимость β от нижнего порога пропускания фильтра (по уровню энергии 0.5) должна быть экспоненциальной с показателем экспоненты, соответствующим квазitemпературе горячих электронов плазмы.

Результаты измерений для контраста 53 и р-поляризации лазерного излучения приведены на рис.3. В области больших энергий экспериментальные данные хорошо аппроксимируются экспоненциально спадающей кривой. Результат подгонки экспериментальных кривых суммой экспоненциально спадающей функции и линии при энергии 9.3 кэВ представлены сплошной линией на том же рисунке. Итоговые результаты по

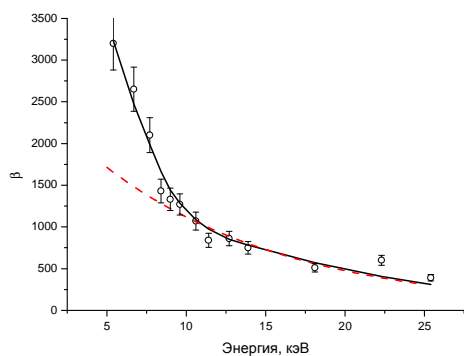


Рис. 3. Подгонка зависимости β от порога пропускания фильтров (р-поляризация, контраст 53).

зависимости эффективности генерации К-альфа излучения галлия и E_h от контраста лазерного излучения представлены на рис 2 б. Величина E_h заметно возросла по сравнению с оценкой по двухдетекторной методике с фильтром в опорном канале с полосой пропускания свыше 2.5 кэВ. Так при максимальном контрасте излучения эта величина выросла с 8 кэВ до 15 кэВ. Важно отметить, что эффективность генерации К-альфа излучения возрастает при ухудшении

контраста на порядок до 2.5×10^{-4} , а абсолютное число рентгеновских квантов характеристического излучения достигает 3×10^8 за импульс.

В разделе 5 представлены результаты по исследованию ионных токов из плазмы. Помимо получения пучков высокоэнергетичных тяжелых ионов с использованием мишени в виде расплавленного металла, нами также проведена количественная обработка ионных сигналов (параграф 5.2), на основе которой получены оценки на зарядовый состав и средние энергии быстрого и медленного ионных компонентов. Как и в предыдущем разделе в качестве основной мишени используется галлий, кроме того приведены результаты для индиевой мишени. Относительно высокое давление насыщенных паров висмута не позволило получить в камере взаимодействия необходимый вакуум и провести измерения с этой мишенью.

Время-пролетные ионные сигналы были получены при установке детектора на расстояниях 30 и 120 см от поверхности мишени. Одновременная регистрация выхода жесткого рентгеновского излучения по двум каналам обеспечила контроль и оценку E_h . Сравнение сигналов для двух поляризаций лазерного излучения (рис.4) указывает на

отсутствие существенных различий для разных состояний поляризации при одинаковом значении контраста. Ухудшение контраста приводит к плавному смещению максимумов ионного тока в область больших задержек относительно момента формирования плазмы.

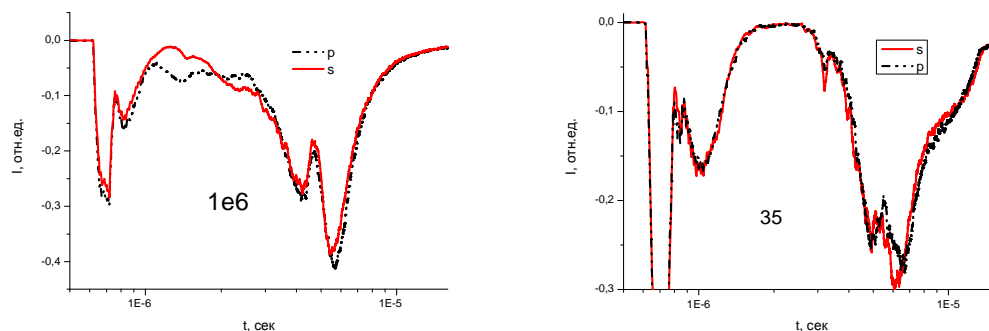


Рис. 4. Сравнение ионных токов, полученных при двух поляризациях лазерного излучения при различных контрастах последнего.

Во временной структуре тока хорошо заметен целый ряд пиков. Поскольку температура жидкого металла достаточно высока, поверхность мишени свободна от водяных и углеводородных пленок, адсорбированных на поверхности обычных мишеней и существенно затрудняющих анализ ионных сигналов, и ионный ток формируется исключительно ионами основного материала мишени (в данном случае - галлия) с возможным включением ионов кислорода вследствие окисления поверхности галлия. Итоговые результаты обработки ионных сигналов представлены на рис.5. Максимального значения свыше 500 эВ температура тепловых электронов плазмы достигает при максимальном контрасте лазерного излучения. Средняя и максимальная энергии высокоэнергетичных ионов галлия максимальны при максимальном контрасте лазерного излучения. Так максимальная зарегистрированная энергия этих ионов составляет 1.3 МэВ. Аналогичные результаты были получены и для индиевой мишени (параграф 5.3).

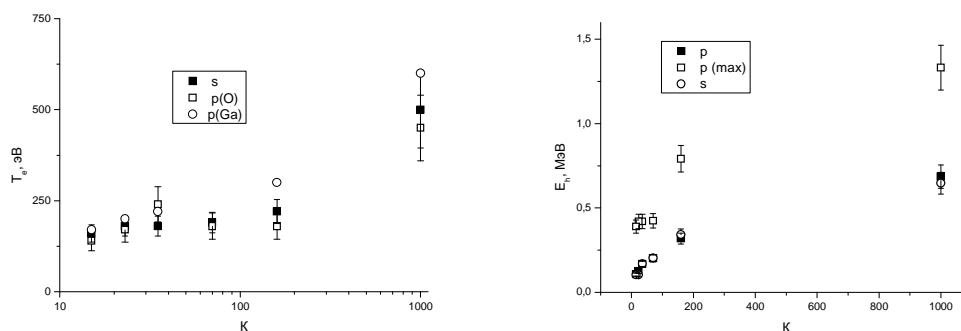


Рис.5. Зависимость температуры тепловых электронов (а) и энергии быстрых ионов (б) от контраста лазерного излучения для двух состояний его поляризации.

В шестом разделе работы обсуждаются результаты экспериментов по оптическому зондированию эволюции плазмы, создаваемой предимпульсом (параграф 6.1), а также проведено обсуждение возможных физических эффектов, приводящих к наблюдаемым в эксперименте зависимостям параметров плазмы от характеристик воздействующего лазерного излучения (параграф 6.2).

В экспериментах по оптическому зондированию полная энергия излучения составляла до 5 мДж, энергия импульса на основной частоте, создающего плазму, не превышала 200 мкДж, что соответствовало контрасту лазерного излучения, для описанных в предыдущих разделах экспериментов, порядка 5.

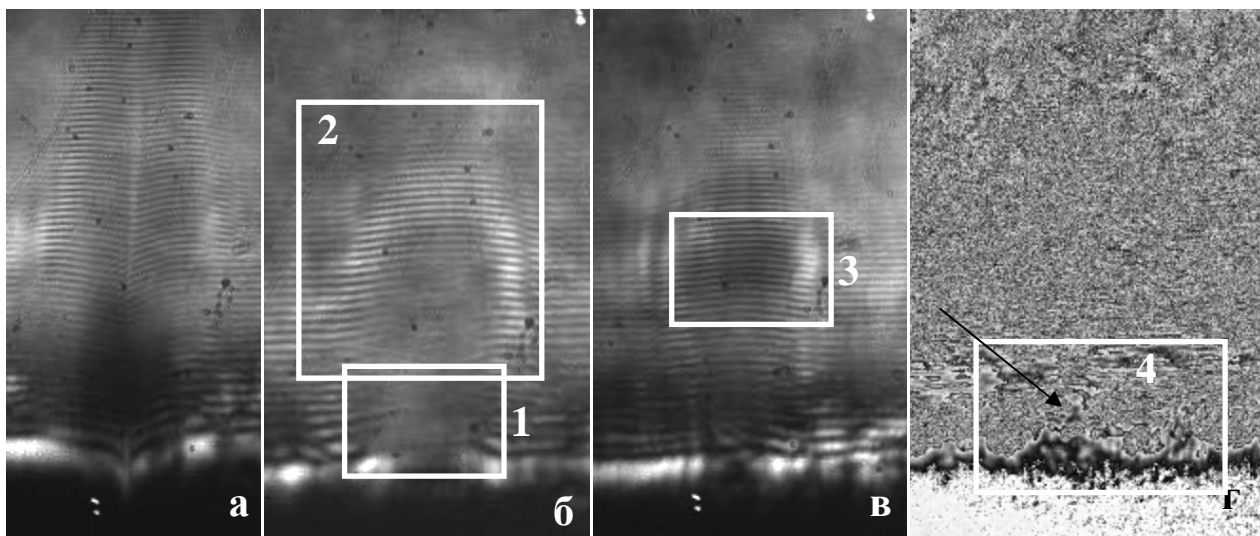


Рис.6 Изображение факела плазмы при разных временах задержки зондирующего излучения: 6 нс (а), 11 нс (б), 13 нс (в) и 13 нс в другом динамическом диапазоне градаций серого (г).

На рисунке 6 приведены изображения плазменного факела при разных временах задержки зондирующего излучения. На изображениях можно выделить две области: непрозрачную для зондирующего излучения темную область 1 и область большего размера 2, в которой происходит лишь рассеяние и преломление зондирующего излучения. Плотность электронов на внешней границе первой области соответствует критической плотности плазмы на длине волны 400 нм, а плотность электронов во второй области существенно меньше критической. Важно отметить, что расширение плазмы происходит в основном вдоль нормали к поверхности мишени, а граница области критической плотности является существенно неплоской для всех задержек лазерного излучения. При больших задержках в 9 нс и более происходит отрыв непрозрачной области 1 от границы мишени и в дальнейшем непрозрачная область постепенно размывается. В то же время на расстоянии от поверхности мишени в части снимков при задержке в 13 нс наблюдается область 3 с повышенной плотностью. Формирование такой области может быть связано с конденсацией остывшей плазмы с тенденцией к формированию жидкой капли. Характерный размер этой

области примерно равен 15-20 мкм. Размеры указанных областей вдоль нормали к поверхности мишени в целом растут с увеличением задержки между импульсами. Скорость фронта критической плотности на длине волны 400 нм составляет $5.8 \pm 0.7 \times 10^5$ см/с, а скорость расширения плазменной области $2 - 21 \pm 2 \times 10^5$ см/с. Отметим, что при контрастировании изображения рис.6 в (рис.6 г) на границе мишени видны существенные возмущения поверхности (область 4) и даже мелкие, микронного размера, капли (показаны стрелкой).

Совокупность полученных нами данных о зависимости характеристик плазмы, создаваемой фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью менее 10^{17} Вт/см², от наносекундного контраста и поляризации этого излучения указывает, что при контрасте порядка 200 и менее в формирование горячего электронного компонента плазмы вносят вклад процессы, не характерные для случая взаимодействия фемтосекундного лазерного излучения с твердотельными мишенями. На это указывает, в первую очередь, исчезновение зависимости параметров плазмы от поляризации излучения при ухудшении контраста, а также существенное увеличение эффективности генерации жесткого рентгеновского излучения и аномально высокие значения средней энергии горячих электронов при низком контрасте излучения. В наших условиях пространственный масштаб градиента электронной плотности значительно больше длины волны излучения. Таким образом увеличение β и рост E_h с ухудшением контраста не могут быть связаны с изменением условий для резонансного поглощения лазерного излучения.

Исчезновение зависимости характеристик горячего электронного компонента от поляризации излучения может быть связано с искривлением поверхности плазмы, с которой взаимодействует основной лазерный импульс. С формированием неглубокого кратера на поверхности мишени связано слабое различие в β , E_h и скоростях быстрых ионов при высоком контрасте лазерного излучения.

Формирование на временах задержек порядка 13 нс плотных неоднородностей плазмы размером около 15-20 мкм, окруженных плазменным облаком докритической концентрации с размером свыше 100 мкм, а также существенное возмущение границы жидкости в области воздействия на тех же задержках, объясняет наблюдаемые нами эффекты. Для таких плазменных образований должен наблюдаться существенный рост эффективности генерации жесткого рентгеновского излучения и средней энергии горячих электронов. Слабая зависимость от поляризации лазерного излучения определяется, очевидно, наличием сильно развитой неоднородной границы критической плотности. Уменьшение средней энергии горячих ионов и температуры тепловых электронов плазмы по сравнению со случаем взаимодействия с достаточно резкой границей плазма-вакуум,

наблюдаемое нами, может быть связано с равномерной по пространству диаграммой разлета ионов по всем направлениям и, соответственно уменьшением средней энергии на один ион по сравнению со случаем высокого контраста (когда разлет ионов носит квазиодномерный характер).

Заключение и выводы

В рамках настоящей работы создана экспериментальная установка для исследования взаимодействия мощного фемтосекундного лазерного излучения с поверхностью расплавленных металлов с использованием рентгеновских и ионных методик для оценивания параметров тепловых и горячих электронов плазмы, а также проведения оптической диагностики плазмы пробным пучком. Система нагрева обеспечивает получение расплавленных металлов непосредственно в процессе проведения экспериментов. Разработанная система дифференциальной откачки обеспечивает измерение ионных токов из плазмы, формируемой на поверхности расплавленного металла с низким давлением насыщенных паров. Реализованная в работе методика теневой оптической диагностики плазменного факела на частоте второй гармоники (400 нм) излучения лазерной системы на сапфире с титаном обеспечивает визуализацию этого факела с временным разрешением в 1 нс и пространственным разрешением около 3 мкм при поле зрения 200x200 мкм².

В рамках работы получен ряд *методически важных результатов*:

1. Существенное влияние на оценку средней энергии горячих электронов по двухдетекторной методике оказывает К-альфа излучение плазмы при условии, что средняя энергия горячих электронов сравнима, либо превышает энергию К-альфа линий, а используемые фильтры прозрачны для этого излучения. Так, в случае галлиевой мишени оценка средней энергии горячих электронов по двухдетекторной методике с использованием фильтров с пропусканием $E_x > 2.5$ кэВ и $E_x > 15$ кэВ дает (контраст 10^6 , р-поляризация) 8 кэВ, а по методу полосовых фильтров – 15 кэВ.
2. Оценка температуры тепловых электронов плазмы и заряда медленных ионов по ионным время-пролетным сигналам для мишеней моноатомного состава может быть выполнена линейной аппроксимацией зависимости энергии пичков, соответствующих ионам с разными зарядами от их номера. Для проведения таким способом оценки энергии горячих электронов и заряда быстрых ионов необходимо проводить измерения на большой время-пролетной базе.
3. В экспериментах по взаимодействию фемтосекундного лазерного излучения с частотой следования импульсов 10 Гц с поверхностью расплавленного металла могут быть использованы разные легкоплавкие металлы, что дает возможность управления

спектральными и энергетическими характеристиками жесткого рентгеновского излучения плазмы.

4. В интервале давлений в камере взаимодействия от 0,02 до 0,18 Тор средние значения эффективности преобразования в жесткое рентгеновское излучение и средней энергии горячих электронов слабо зависят от давления в камере взаимодействия. При ухудшении давления до 0,185 Тор и выше происходит резкое падение выхода рентгеновского излучения и слабое возрастание средней энергии горячих электронов в этой же области. Этот эффект не зависит от поляризации лазерного излучения.

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

1. При взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения большой интенсивности и высокого контраста с поверхностью расплавленного металла происходит эффективное ускорение многозарядных ионов основного материала мишени вдоль нормали к этой поверхности. При интенсивности лазерного излучения порядка 5×10^{16} Вт/см² средняя энергия ионов индия на заряд составляет около 25 кэВ, а максимальная энергия ионов галлия и индия превышает 1 МэВ.
2. Эффективность генерации жесткого рентгеновского излучения и средняя энергия горячих электронов плазмы, формируемой фемтосекундным лазерным излучением с частотой следования импульсов 10 Гц, существенно зависят от наносекундного контраста лазерного излучения и слабо зависят от его поляризации. С ухудшением контраста возрастает число реализаций с аномально высокими эффективностью генерации жесткого рентгеновского излучения и средней энергией. В случае галлиевой мишени максимальные значения достигаются при контрасте 30-50. При этом эффективность преобразования в жесткий рентгеновский диапазон возрастает в 200-300 раз, а энергия горячих электронов в 3 и более раз.
3. В случае галлиевой мишени зависимость эффективности генерации К-альфа линии излучения галлия от контраста и поляризации повторяет общие закономерности: рост эффективности с ухудшением контраста и слабая зависимость от поляризации. Эффективность генерации К-альфа линии составляет порядка 2.5×10^{-5} при контрасте 10^6 и имеет максимум при контрасте 53 в 2.5×10^{-4} .
4. С ростом атомного номера материала мишени существенно возрастает выход жесткого рентгеновского излучения. Наблюдаемые изменения в распределении средней энергии горячих электронов по реализациям связаны в первую очередь с различием в значениях контраста лазерного излучения, при которых наблюдается существенное число

- реализаций с аномально высокими выходом жесткого рентгеновского излучения и средней энергией горячих электронов.
5. На основе анализа ионных время-пролетных сигналов нами получено, что при формировании плазмы на поверхности расплавленного металла лазерным излучением с интенсивностью порядка 5×10^{16} Вт/см² (энергия импульса 1 мДж, длительность 50 фс):
- i. Температура тепловых электронов плазмы галлия при контрасте по интенсивности свыше 10^6 достигает 500 эВ при р и s –поляризациях лазерного излучения. При ухудшении контраста эта температура уменьшается до 200-300 эВ и не зависит от поляризации излучения;
 - ii. Заряд медленных ионов плазмы галлия составляет при максимальном контрасте около 10, а максимальный заряд этих ионов – 13, т.е. соответствует иону галлия с полностью заполненными 1-3 электронными оболочками. При ухудшении контраста зарядовый состав медленных ионов галлия меняется слабо и также не зависит от поляризации излучения;
 - iii. В ионном токе галлия наблюдается вклад ионов кислорода с кратностями ионизации вплоть до 8+, а слабый протонный сигнал заметен лишь при максимальном контрасте лазерного излучения. Оценка температуры электронов по ионам кислорода совпадает, в пределах погрешности измерений, с оценкой этой температуры по ионам галлия;
 - iv. «Температура» горячих электронов, оцененная по ионному сигналу, полученному для время-пролетной базы 120 см в случае индиевой мишени, составляет 25 кэВ, а заряд быстрых ионов индия в среднем составляет около 10+. Данная оценка квазitemпературы находится в разумном согласии с оценкой, полученной для средней энергии горячих электронов по рентгеновскому свечению плазмы, с учетом соотношения между этими величинами.
6. Найденные по результатам обработки время-пролетных ионных сигналов зависимости температуры электронов плазмы, средней энергии горячих электронов от контраста лазерного излучения в целом противоречат результатам, полученным при использовании рентгеновских методик, но подтверждают отсутствие зависимости данного параметра от поляризации лазерного излучения, обнаруженное при использовании этих методик.
7. Методика оптического зондирования позволила выявить, что плазменный факел состоит из двух областей – области с плотностью плазмы, превышающей критическую, и области плазмы малой плотности. Граница области критической плотности имеет существенно не плоскую форму. При энергии лазерного импульса порядка 200 мкДж и на временах до 10 нс относительно момента формирования плазмы граница области критической плотности двигается вдоль нормали к поверхности мишени со скоростью около 6 км/с. В

то же время движение фронта плазмы происходит со скоростью около 21 км/с в том же направлении. На временах порядка 10 нс область плазмы с плотностью, превышающей критическую, отрывается от поверхности мишени.

8. Наблюдаемые нами особенности во взаимодействии фемтосекундного лазерного излучения с интенсивностью порядка 5×10^{16} Вт/см², имеющем предимпульс с опережением 13 нс и контрастом 400 и ниже, с поверхностью расплавленного металла могут быть связаны с формированием плотных неоднородностей плазмы размером около 15-20 мкм, окруженных плазменным облаком докритической концентрации с размером свыше 100 мкм, а также существенным возмущением границы жидкости в области воздействия.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Д.С. Урюпина, М.В. Курилова, Н. Моршедиан, Р.В. Волков, А.Б. Савельев «Особенности формирования горячей плазмы при воздействии интенсивных фемтосекундных импульсов на поверхность расплавленного металла», Вестник Моск. ун-та, сер.3. Физика. Астрономия, №4, 34-39 (2008).
2. А.Б.Савельев, Р.В.Волков, М.В.Курилова, Н.Моршедиан, Д.С.Урюпина «Особенности взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с жидкими металлическими мишенями», Международный научный семинар математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах (LPrM³-IV-2006), Москва, 30 января - 3 февраля 2007 года, “Знание. Понимание. Умение”, №3, 253 (2007).
3. M.V. Kurilova, N.Morshedian, A.B.Savel'ev, D.S. Uryupina, and R.V. Volkov “Contrast Effect at Femtosecond Laser-Plasma Interaction with Liquid Metals” Proceedings of III International Conference Frontiers of nonlinear physics, Nizhny Novgorod-Saratov-Nizhny Novgorod, Russia, July 3-9, 2007, p.103.
4. M.V.Kurilova, N.Morshedian, A.B.Savel'ev, D.S. Uryupina, and R.V. Volkov “Peculiarities of Femtosecond Laser Radiation Interaction with Liquid Metal Targets” Technical digest ICONO/LAT-2007, May 28 – June 1, 2007, Minsk, Belarus, I03-13, p.90.
5. A.B. Savel'ev, M.V. Kurilova, N. Morshedian, D.S. Uryupina, R.V. Volkov “Peculiarities of Femtosecond Laser Radiation Interaction with Liquid Metal Targets”, Program of 5th Workshop Complex Systems of Charged Particles and Their Interaction with Electromagnetic Radiation, April 9-11, 2007, A.M.Prokhorov General Physics Institute, Moscow, Russia.
6. А.Б.Савельев, М.В.Курилова, Д.С.Урюпина, Н.Моршедиан “Особенности взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с жидкими металлическими мишенями», Программа четвертого международного научного семинара «Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах», Москва, 30 января- 3 февраля 2007 г.
7. Д.С.Урюпина, М.В.Курилова, Н.Моршедиан, К.А.Иванов, А.Б.Савельев, Р.В.Волков “Особенности формирования плазмы при воздействии мощного фемтосекундного лазерного излучения на поверхность жидкого металла», Программа пятого международного научного семинара «Математические модели и моделирование в лазерно-плазменных процессах», Москва, 29 января- 2 февраля 2008 г.