

На правах рукописи

Лачко Илья Михайлович

**ДИАГНОСТИКА ИОННОГО ТОКА
ГОРЯЧЕЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ,
СФОРМИРОВАННОЙ ФЕМТОСЕКУНДНЫМ
ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ:
РОЛЬ ПРИМЕСНОГО СЛОЯ**

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва – 2006

Работа выполнена в Международном Учебно-Научном Лазерном Центре и на физическом факультете Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова.

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Чевокин Виктор Константинович

доктор физико-математических наук
Черныш Владимир Савельевич

Ведущая организация: Институт теплофизики экстремальных состояний, Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук

Защита состоится 19 октября 2006 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.31 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу:
119992, ГСП-2 Москва, Ленинские горы, МГУ, Физический факультет,
Корпус Нелинейной Оптики, аудитория им. С.А.Ахманова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан: “ 15 ” сентября 2006 г.

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

Т.М. Ильинова

I. Общая характеристика работы

Актуальность темы

Последние два десятилетия сопровождались бурным развитием техники построения мощных лазерных систем, способных генерировать сверхкороткие импульсы с длительностью 30–300 фс и энергией до единиц Дж. Жесткая фокусировка такого излучения позволяет достигать интенсивностей световых полей в перетяжке объектива на уровне $\sim 10^{17}$ Вт/см² и выше. Это обстоятельство вызвало существенный научно-исследовательский интерес к вопросу поведения вещества (и особенно вещества находящегося в конденсированном состоянии) в столь интенсивном электромагнитном поле, поскольку его напряженность становится сравнимой с внутриатомным кулоновским полем в атоме водорода ($\sim 5 \cdot 10^9$ В/см).

Лазерная плазма, формируемая при взаимодействии столь интенсивного излучения с твердотельным веществом, принципиально отличается по своим характеристикам и возможным приложениям от плазмы, формируемой настолько же энергетичными (~ 1 Дж), однако менее интенсивными наносекундными импульсами, которая уже была широко исследована в 60-х–70-х годах прошлого столетия. В частности, такие уникальные характеристики фемтосекундной лазерной плазмы (ФЛП) как около-твердотельная ионная плотность, а также высокая кратность ионизации (соответствующая температуре порядка 1 кэВ), стимулировали проведение исследований в различных областях науки и техники, среди которых: физика лазерного термоядерного синтеза, инициирование реакций внутриядерных переходов, создание новых типов сверхинтенсивных импульсных источников (ионов, электронов, коротковолнового электромагнитного излучения) и т.п.

Появление уникальных энергетических характеристик ФЛП является, в свою очередь, результатом уникальных физических процессов, сопровождающих поглощение лазерной энергии веществом, которые не наблюдаются при меньших интенсивностях. Так, уже при интенсивностях на уровне 10^{16} – 10^{17} Вт/см² классические (столкновительные) механизмы поглощения световой энергии, ответственные в первую очередь за формирование так называемой тепловой электронной компонент плазмы, “перестают работать”. Дальнейшее поглощение лазерной энергии осуществляется за счет дополнительных, бесстолкновительных механизмов, которые приводят к формированию так называемой горячей электронной компоненты. В целом, на их долю может приходиться до 10% лазерной энергии уже при субрелятивистском уровне интенсивности. При этом средняя энергия горячих электронов может на 1-2 порядка превосходить среднюю энергию тепловых.

Впоследствии на границе плазма-вакуум тепловые и горячие электроны образуют так называемое амбиполярное поле, которое приводит к ускорению тяжелой, ионной компоненты плазмы. При этом скорость, набираемая наиболее быстрыми из этих ионов, становится сравнимой с ионнозвуковой скоростью в плазме $\sim \sqrt{3Z \cdot T_e / M}$.

Несомненно, важным аспектом задачи изучения физики высокотемпературной лазерной плазмы является диагностика параметров испускаемых ею частиц. При этом все известные методы диагностики плазмы можно разделить на две группы: оптические и корпускулярные. Оптическая диагностика плазмы может включать в себя регистрацию квантов света весьма широкого спектрального диапазона, начиная от вакуумного ультрафиолетового и рентгеновского излучения и заканчивая излучением видимого спектра.

В задачи корпускулярной диагностики лазерной плазмы входят: регистрация тока ионов, электронов, нейтральных частиц плазмы, кластерных структур и пр. с возможностью определения их энергий, скоростей и масс, зарядовых состояний, абсолютных величин токов, телесных углов разлета и пр. Среди существующих и широко используемых корпускулярных методов диагностики можно выделить такие методики как: времяпролетная, масс-спектрометрическая, масс-спектрометрический анализ предварительно перезаряженных ионов, времяпролетные измерения тока ионов, ускоренных во внешнем электростатическом поле и пр.

В связи с тем, что до последнего времени в лаборатории сверхсильных световых полей физического факультета МГУ корпускулярные методы диагностики лазерной плазмы не были развиты в должной мере (в отличие от оптических методов), одной из основных задач настоящей диссертационной работы стало создание экспериментального масс-спектрометрического комплекса на базе масс-энергоанализирующего устройства.

Существенное влияние на процесс ускорения ионной компоненты плазмы оказывают искусственно созданные модификации структуры мишени и прежде всего, ее поверхностного слоя. К таким модификациям можно отнести: предварительное формирование рельефа поверхности мишени, использование многокомпонентных (двухслойных), а также тонкопленочных мишеней. В частности, использование двухслойных мишеней, в которых наружный тонкий слой представлен элементом с меньшим атомным номером, приводит к увеличению эффективности ускорения “легких” ионов. Напротив, “тяжелые” ионы, расположенные в нижнем слое мишени, ускоряются менее эффективно.

Весьма похожая картина наблюдается при использовании мишени, поверхность которой загрязнена углеводородными соединениями, покрыта окисным слоем либо содержит адсорбированные пары воды. В этом случае роль “легкого” внешнего слоя выполняют атомы Н, С и О. К сожалению, далеко не всегда желаемым оказывается эффективное ускорение примесных ионов с

одновременным уменьшением энерговклада в ионы основного материала мишени. Все это определило вторую из основных задач диссертационной работы: задачу изучения роли примесного слоя на параметры ионного тока формируемой лазерной плазмы, а также разработка методики очистки мишени от примесей.

Цели диссертационной работы

1. Создание экспериментальной установки для масс-спектрометрической диагностики заряженных частиц из лазерной плазмы, формируемой на поверхности твердотельной мишени фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью до 10^{17} Вт/см². Установка должна обеспечивать регистрацию заряженных частиц с энергиями в диапазоне от сотен до десятков тысяч эВ при разрешающей способности по энергии не менее 10–20 и хорошей помехозащищенности от электромагнитного и корпускулярного излучения плазмы;
2. Разработка и оптимизация методики импульсной лазерной очистки мишени от содержащихся на её поверхности примесного и окисного слоев. Исследование влияния параметров импульсной лазерной очистки (плотность энергии импульса, время опережения по отношению к фемтосекундному импульсу) на параметры формируемого тока из плазмы;
3. Измерение энергетических, массовых и зарядовых спектров частиц из лазерной плазмы, формируемой фемтосекундным импульсом с интенсивностью свыше 10^{16} Вт/см² на поверхности твердотельной мишени, в зависимости от атомного состава поверхностного слоя мишени и параметров этого импульса (энергетический контраст).

Научная новизна работы

1. В струе ионов, вылетающих из горячей плотной плазмы, сформированной сверхинтенсивным фемтосекундным лазерным импульсом на твердотельной поверхности мишени, были зарегистрированы высокоэнергетические однократно заряженные отрицательные ионы с высоким выходом до 10^{-2} относительно общего числа положительных ионов;
2. Путем прямого измерения энергетического спектра электронов из фемтосекундной лазерной плазмы, формируемой на твердотельной поверхности мишени импульсами с интенсивностью $\sim 10^{16}$ Вт/см², подтверждено присутствие двух энергетических компонент, соответствующих тепловым и горячим электронам;
3. Показана возможность управления параметрами ионных токов (таких как средняя и максимальная энергия основных ионов плазмы, кратности ионизации ионов) путем изменения условий предварительной импульсной лазерной очистки.

Практическая ценность

1. Созданная экспериментальная установка на основе времяпролетного масс-спектрометра в дальнейшем может быть успешно использована в экспериментах по диагностики как ионного, так и электронного токов из фемтосекундной лазерной плазмы формируемой на поверхности твердотельной мишени импульсами с интенсивностью, не превышающей 10^{17} Вт/см². Написанный пакет программного обеспечения позволяет осуществлять обработку данных регистрируемых масс-спектрометром с высокой степенью автоматизации;
2. Разработанная методика очистки мишени в дальнейшем может быть использована для эффективного удаления с поверхности мишени как углеводородного, так и оксидного примесных слоев;
3. Результаты, полученные в рамках настоящей диссертационной работы, позволяют утверждать о возможности управления параметрами ионных пучков из фемтосекундной лазерной плазмы посредством применения предварительной импульсной лазерной очистки мишени, а также посредством варьирования параметров этой очистки. Кроме того, существует возможность управления параметрами ионных токов из расширяющегося плазменного облака путем изменения величины энергетического контраста фемтосекундного лазерного импульса;
4. Обнаруженные в горячей фемтосекундной лазерной плазме высокоэнергетические отрицательные ионы примесных элементов позволяют говорить о фемтосекундной лазерной плазме как о возможном интенсивном источнике отрицательных ионов с энергиями не менее 34 кэВ и величиной общего выхода на уровне 0.1-1.0% за один лазерный выстрел при интенсивности светового поля на уровне 10^{16} Вт/см².

Защищаемые положения

1. Созданная на основе электростатического масс-спектрометра диагностическая установка обеспечивает измерение энергетических, зарядовых, а также массовых спектров заряженных частиц из плазмы в диапазоне энергий, отнесенных на единицу заряда, от 100 эВ до 47 кэВ при разрешающей способности $r_E = 12$;
2. Формирование тока быстрых ионов из плазмы, образуемой на поверхности твердотельной мишени в условиях вакуума на уровне 10^{-5} Торр при облучении фемтосекундным лазерным импульсом с интенсивностью порядка 10^{16} В/см², определяется наличием поверхностного примесного слоя. Наибольшую энергию на единицу заряда получают легкие примесные ионы,

в то время как ионы основного материала мишени набирают существенно меньшие скорости;

3. Предварительная импульсная лазерная очистка поверхности обеспечивает формирование ионного пучка, преимущественно состоящего из ионов основного материала мишени со средней энергией быстрых ионов, соответствующей энергии горячих электронов, и позволяет управлять параметрами сформированного ионного пучка: его энергетическим и зарядовым спектром;
4. Взаимодействие ионного пучка из плазмы, формируемой сверхинтенсивным лазерным импульсом, с молекулами остаточного газа при давлении в вакуумной камере на уровне 10^{-5} Торр, приводит к формированию высокоэнергетических отрицательных ионов на основе атомов, имеющих энергию сродства к электрону свыше 0.1 эВ. При этом энергетический спектр отрицательных ионов с высокой точностью совпадает с энергетическим спектром однократно заряженных положительных ионов. Существенное число отрицательных высокоэнергетических легких ионов, регистрируемых в эксперименте, обусловлено наличием примесного слоя на поверхности твердотельной мишени.

Апробация работы и публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 9 статей в отечественных и зарубежных научных журналах. Среди них: 2 статьи в журнале “Applied Physics B” [1, 2], также по 2 работы в журналах “Письма в ЖЭТФ” [3, 4] и “Квантовая Электроника” [5, 6]. По одной публикации вышло в журналах “Plasma Physics and Controlled Fusion” [7], “Laser Physics” [8], а также “ЖЭТФ” [9].

Общее число публикаций с учетом статей в сборниках и трудах конференций, а также тезисов докладов составляет 42 штуки. В их числе 6 статей в “SPIE Proceedings” опубликованных по результатам докладов на международных конференциях по лазерной и нелинейной оптике [10, 11, 12, 13, 14, 15].

Основные результаты исследований, представленных в диссертации, также докладывались автором на ряде научных конференций: 2^{-ая} межд. конф. молодых ученых и специалистов “Оптика-2001” (Санкт-Петербург, Россия, 2001); Межд. конф. по квантовой электронике “IQEC-2002” (Москва, Россия, 2002); 2^{-ая} научная молодежная школа “Оптика-2002” (Санкт-Петербург, Россия, 2002); 11^{-ая} конф. по лазерной оптике “LO-2003” (Санкт-Петербург, Россия, 2003). Два устных доклада было сделано в рамках межд. конф. по нелинейной оптике “ICONO-LAT-2005” (Санкт-Петербург, Россия, 2005). Также диссертант является соавтором докладов, представленных на научных конф.: 17^{-ая} конф. по когерентной и нелинейной оптике “ICONO-2001” (Минск, Беларусь, 2001); 3^{-ий} итало-российский симпозиум по проблемам физики мощных сверхкоротких лазерных импульсов (Палермо, Италия, 2004), 10^{-й}, 11^{-ый} и 12^{-ый} межд. Симпозиумы по лазерной физике “Laser Physics” (Москва, Россия, 2001; Братислава,

Словакия, 2002; Гамбург, Германия, 2003), 5^{-ый} итало-российский симпозиум по проблемам лазерной физики и технологий (Москва, Россия, 2003); межд. конф. ALT-02 (Адельбаден, Швейцария, 2002); 1^{-ый} и 2^{-ой} межд. симпозиумы по актуальным проблемам нелинейной волновой физики “NWP” (Нижний Новгород – Санкт-Петербург, Россия, 2003 и 2005); 2^{-ая} межд. конф. по современным вопросам нелинейной физики “FNP-2004” (Нижний Новгород – Санкт-Петербург, Россия, 2004); 3^{-ий} межд. семинар по вопросам плазмы и её взаимодействия с электромагнитным излучением (Москва, Россия, 2005); 2^{-ой} симпозиум по лазерам и фотонике (Каяни, Финляндия, 2005); 4^{-ое} совещание AFOSR по изомерным ядрам (Туссон, США, 2001); европейская конф. по лазерам и электрооптике “CLEO@/EUROPE” (Мюнхен, Германия, 2005).

Кроме этого, полученные диссертантом научные результаты легли в основу двух докладов на семинарах в институте Нелинейной Оптики и Спектроскопии им. Макса Борна (Берлин, Германия) в 2004 и 2005 годах, а также одного доклада на семинаре в МЛЦ МГУ в 2004 году. Список опубликованных работ приведен в заключительной части настоящего автореферата на стр. 19-21.

Личный вклад автора

Все изложенные в диссертационной работе оригинальные результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии. Автором осуществлялась разработка и создание диагностической аппаратуры, проведение экспериментальных исследований, а также обработка данных и интерпретация полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа изложена на 135 страницах и включает 46 рисунков. Общее число ссылок составляет 151. Каждую главу предваряет вступительная часть, представляющая краткое содержание и основные задачи текущей главы. В заключение каждой из глав сформулированы основные результаты, достигнутые в ней.

II. Содержание диссертации

Во **введении** диссертационной работы происходит знакомство с тематикой исследований, обосновывается актуальность темы, формулируются цели, задачи, научная новизна, практическая ценность работы и защищаемые положения.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору методов массового и спектрального анализа, которые могли бы быть применены для

корпускулярной диагностики лазерной плазмы сверхкороткого импульса субрелятивистской интенсивности, формируемой при его жесткой фокусировке на поверхность твердотельной мишени. Существенная часть главы (первые два параграфа) отведена описанию собственно механизма формирования ФЛП. Соответствующий материал также носит обзорный характер. Основным, практически полезным результатом первой главы (с точки зрения итоговых задач настоящей диссертационной работы), является проектирование диагностического комплекса, позволяющего осуществлять масс-спектрометрический анализ корпускулярного тока лазерной плазмы в условиях интенсивности $10^{14} - 10^{17}$ Вт/см².

Представим содержание каждого параграфа более подробно:

В параграфе 1.1 рассматривается этап поглощения лазерной энергии веществом, сопровождающийся образованием свободных электронов, передачей им энергии световой волны. В этот временной отрезок ионная компонента вещества не принимается в рассмотрение, поскольку может считаться неподвижной. В параграфе обсуждаются процессы, определяющие формирование характерного двойного энергетического распределения электронов в плазме.

В параграфе 1.2 описывается поведение плазменной системы во временной период, последующий этапу воздействия излучения на вещество (начинающегося спустя примерно 1 пс после начала действия лазерного импульса). Здесь, традиционно, внимание привлечено процессу ускорения ионной компоненты за счет амбиполярного электростатического поля свободных электронов. Однако, обзор настоящей диссертационной работы отличает то, что особое место в нём занимает рассмотрение роли легкого примесного слоя (содержащегося на поверхности мишени) на эффективность ускорения основной и более тяжелой ионной компоненты. Присутствие такого слоя может быть обусловлено как естественными причинами – наличием различного рода загрязнений, так и являться интерпретацией экспериментальной схемы, в которой бы использовались двухслойные мишени.

Среди основных целей первых двух параграфов ставится: приведение характерных значений параметров электронных (§1.1), а также ионных (§1.2) токов из лазерной плазмы свойственных импульсу фемтосекундной длительности и субрелятивистской интенсивности. Перечисленные данные с одной стороны послужили ориентиром в выборе параметров экспериментальной диагностической установки по спектрометрическому анализу частиц из ФЛП (§1.4 и §2.2), с другой стороны позволили сопоставить впоследствии измеренные с её помощью данные с прогнозируемыми величинами, а также с величинами, известными в литературе из публикаций других авторов. Так, среди прочего, в §1.1-1.2 было получено, что в условиях интенсивности $\sim 10^{16}$ Вт/см² на поверхности твердотельной мишени будет формироваться лазерная плазма, компоненты которой будут иметь следующие энергетические и зарядовые

характеристики: 1) Ожидается, что спектр электронов будет содержать две энергетические компоненты с температурами не выше 500эВ (для тепловой компоненты) и порядка ~5кэВ (для горячей электронной компоненты); 2) Ожидается, что средняя энергия ионов будет составлять величину порядка 10-100 кэВ. При этом в случае использования кремниевой мишени, максимальная кратность ионизации составит 12+, а при использовании мишени из железа 16+.

В параграфе 1.3 сделан обзор экспериментальных схем и методов спектрального и массового анализом частиц лазерной плазмы.

В §1.4, основываясь на заключениях, сделанных в §1.1-1.3, была спроектирована оригинальная схема электростатического масс-анализатора, который обеспечивает регистрацию ионного и электронного токов в диапазоне энергий до нескольких десятков кэВ/Z, с разрешающей способностью не ниже $r_E \sim 10-20$, и обладает чувствительностью, достаточной для регистрации одиночных частиц. В частности, спроектированный анализатор позволяет раздельно идентифицировать: 1) токи таких схожих по параметру M/Q ионов как Fe^{15+} и Fe^{16+} , 2) существенную часть спектра как тепловой, так и горячей электронной компоненты. Кроме того, 3) масс-спектрометр обладает возможностью одновременного проведения времяпролетных ионных измерений.

Схема собранного диссертантом масс-спектрометрического комплекса изображена на рисунке 1.



Рис.1. Схема комплекса по масс-спектрометрической диагностике лазерной плазмы

Задачами **второй главы** диссертационной работы ставится: 1) описание созданного масс-анализатора электростатического поля (а также экспериментального диагностического комплекса в целом); 2) приведение результатов его тестов и калибровочных измерений.

В параграфе 2.1 представлена схема экспериментальной установки целиком, тогда как сам масс-анализатор описан в §2.2. Спектрометр был собран в соответствии со сформулированными в заключение первой главы требованиями, определяющими возможность корпускулярной диагностики горячей

лазерной плазмы. Далее в §2.2 производится предварительный численный расчет ряда технических параметров анализатора (динамический диапазон, минимальный регистрируемый ток и пр.). Так, энергетический параметр спектрометра составил $k=5\pm 1$ эВ/В; разрешающая способность $r_E=10$; рабочий диапазон - от 500 эВ до 47 кэВ. В заключение §2.2 приводится описание программного обеспечения, разработанного диссертантом в среде Labview 6.0 и предназначенного для анализа и статистической обработки данных, регистрируемых прибором и считываемых при помощи цифрового осциллографа.

В §2.3 описывается серия работ по калибровке спектрометра использующей различные методы и схемы. С этой целью применялся ряд электронных источников, как с предельно узким, так и с достаточно широким и при этом заранее известным энергетическим спектром. В первом случае использовалась электронная пушка, самостоятельно разработанная диссертантом, во втором – тритиевый источник. В результате калибровочных измерений было вычислено, что $k=4.25\pm 0.1$ эВ/В, а $r_E=12.5\pm 0.5$. Измеренная функция чувствительности детектора ВЭУ-7 к электронному току была аппроксимирована как $s(E)=1+(E^2+1/2)^{-1}$, а зависимость коэффициента усиления от напряжения была найдена равной $Y(U)=500\cdot U^{12\pm 0.5}$, (где размерности E и U - [кэВ] и [кВ] соответственно). Отметим, что в литературе встречается зависимость для $Y(U)$ в виде степенной функции с показателем, равным 16 (данные относятся к детектору, собранному из одной микроканальной пластины).

В §2.4, представлены первые данные по диагностике электронной компоненты плазмы. В условиях интенсивности $\sim 10^{16}$ Вт/см² демонстрируется ярко выраженное двухкомпонентное распределение по энергиям, соответствующее горячим и тепловым электронам плазмы (Рис 2). Настоящий результат был

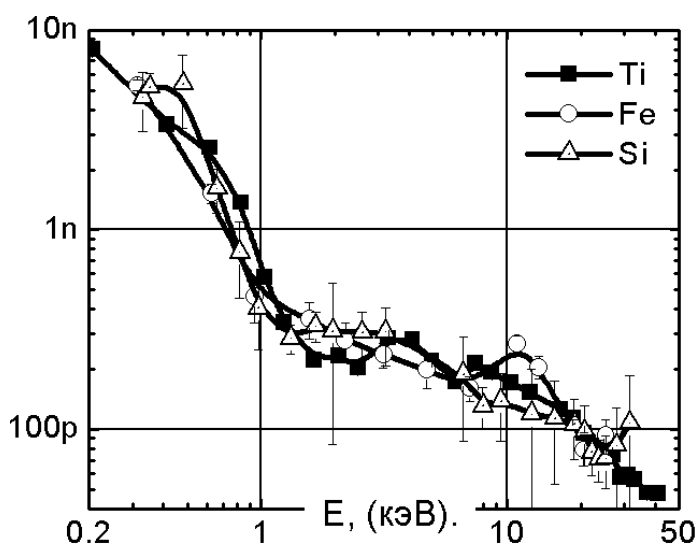


Рис.2. Энергетические спектры электронного тока из ФЛП ($I\sim 10^{16}$ Вт/см²; мишени Si, Ti, Fe).

получен впервые путем прямого измерения электронного спектра. Измеренный спектр с хорошей точностью соответствует сумме двух экспоненциальных распределений с температурами $T_{th}=240\pm 60$ эВ и $T_{hot}=14.4\pm 4$ кэВ. При этом было установлено отсутствие зависимости профиля энергетического спектра, а также рассчитанных температур от типа материала мишени (по крайней мере, на примере мишеней из Si, Ti и Fe).

Измерения были повторены для различных углов падения излучения на мишень (45 и 61 градус), а также в условиях низкого энергетического контраста ($C_E=10$; исходно $C_E=1000$). В случае большего угла падения излучения на мишень, был отмечен рост общего количества горячих электронов по отношению к тепловым, что было объяснено увеличением амплитуды р-поляризованной компоненты излучения. Показано, что изменение контраста лазерного излучения не влияет существенным образом ни на энергетический спектр электронов, ни на параметры некогерентного рентгеновского излучения из плазмы (таких как: общий выход, средняя энергия).

В параграфе также указывается на наличие в ФЛП двух четко разграниченных в пространстве электронных компонент: “убегающие” электроны (с направленным характером движения) и электроны собственно плазмы (с беспорядочным характером движением). Такое деление электронов является независимым по отношению к известному делению электронов на тепловую и горячую компоненты. Конструктивным недостатком созданного масс-спектрометра является возможность регистрации исключительно “убегающей” компоненты. Количественное соотношение горячих электронов к тепловым среди “убегающих” электронов плазмы составило $A = 0.7 \pm 0.3$. Это отношение является, по-видимому, единственным параметром, характеризующим электронный ток из ФЛП, который бы зависел от атомного номера мишени. Так, в случае мишени из железа, это отношение оказывается примерно в два раза выше (0.90 ± 0.2) аналогичного значения полученного для мишени из кремния (0.45 ± 0.1).

В **третьей главе** диссертационной работы описано измерение энергетических, массовых и зарядовых спектров ионов из ФЛП ($I \sim 2 \cdot 10^{16}$ Вт/см²). В качестве мишеней использовались: Si, Fe, Ti, DKDP. В условиях вакуума с давлением остаточного газа на уровне 10^{-5} Торр в струе разлетающейся ФЛП масс-спектрометрическими методами было обнаружена значительная доля (до 2/3) примесных ионов H, C, и O. Такой результат был объяснен неотъемлемым присутствием на поверхностях мишеней окисных пленок, адсорбированных паров воды, а также углеводородных примесей.

Измерения средней энергии показали, что в ряде случаев (в частности для H^{1+} и C^{6+}), имеет место хорошее согласование с результатами численных расчетов. Так, энергия оцененная по формуле для ионнозвуковой скорости ($\sim \sqrt{3Z \cdot T_e / M}$), в условиях интенсивности $\sim 10^{16}$ Вт/см², составила ~ 10 -100 кэВ. С другой стороны, в ходе эксперимента эти значения составили 9 кэВ и 40 кэВ соответственно для H^{1+} и C^{6+} . Зарядовые спектры ионов плазмы также неплохо согласуются с расчетными значениями, полученными, например, на основании известного приближенного соотношения между потенциалом ионизации и температурой $U_z / T \sim 2$ -3 (верного в случае около-твердотельной ионной плотностью, а также в приближении ионизационного равновесия). Так,

предсказанная в 1-й главе диссертации полная ионизация ионов С, на самом деле успешно наблюдалась в эксперименте.

Тем не менее, определенные расхождения экспериментальных результатов с упомянутыми численными расчетами все же имели место. В первую очередь несоответствия проявлялись в отношении “тяжелых” ионов основного материала мишени. В частности, величина средней энергии для ионов Si^{1+} , Si^{2+} имела порядок всего 3-3.5 кэВ/Z, а максимальный заряд (для Si) достигал не 12+ (как предсказывалось в главе 1), а только лишь 6+.

Впоследствии это позволило сделать заключение о том, что на процесс формирования лазерной плазмы в результате воздействия фемтосекундных импульсов с поверхностью твердотельных мишеней существенное влияние оказывает присутствие примесного слоя, содержащегося на поверхности. Было указано на два основных нежелательных следствия, к которым приводит наличие примесей на поверхностях мишеней: 1) Основной материал мишени представлен лишь незначительной частью ионов в общей плазменной струе (во всяком случае среди ионов с энергией 100 эВ и более); 2) Среди быстрых ионов плазмы, набирающих максимальную энергию в процессе ускорения, лишь малая часть являются ионами основного материала мишени.

Пример зарядового и энергетического распределений ионов плазмы в случае интенсивности лазерного излучения $\sim 2 \cdot 10^{16}$ Вт/см² представлены на рисунках 3 и 4. Данные получены при использовании мишеней из Ti и Si соответственно.

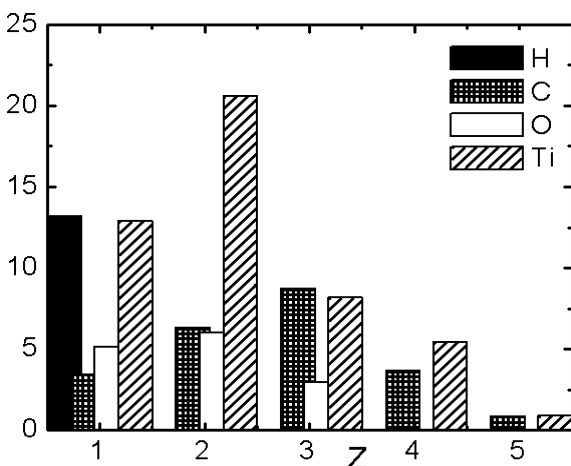


Рис.3. Зарядовый спектр ионов (Ti).

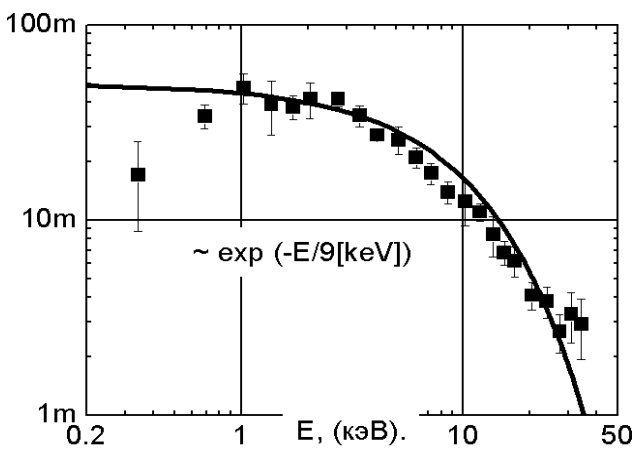


Рис.4. Энергетический спектр протонов ФЛП

Кроме этого, одним из наиболее оригинальных результатов главы является обнаружение отрицательных высокоэнергетических ионов в струе разлетающейся плазмы. Подобное наблюдение было сделано впервые для столь горячей плазмы, в которой кратность ионизации ионов углерода на этапе ее

формирования достигает $6+$. Для большинства элементов отрицательные ионы являются энергетически стабильными образованиями, поэтому важность полученных нами результатов состоит не столько в факте их регистрации, сколько в количестве зарегистрированных ионов с отрицательным зарядом, которое составило от 10^{-2} до 10^{-3} относительно количества положительных ионов. Отметим, что уравнение Саха (которое мы вправе применять как оценку сверху) предсказывает количественное отношение отрицательных ионов на 4-9 порядков ниже значений, полученных в эксперименте. Другим важным результатом спектрометрических измерений явилось то, что средние и максимальные энергии отрицательных ионов оказались сопоставимы со значениями измеренными для соответствующих положительных ионов.

Впоследствии численное моделирование показало, что формирование отрицательных ионов в расширяющейся лазерной плазме происходит в результате перезарядки положительных ионов на молекулах остаточного газа в камере. При этом фактором, определяющим величину общего потока отрицательных ионов, является давление остаточного газа.

В диссертации показано, что спектр высокоэнергетических отрицательных ионов коррелирует со спектром соответствующих положительных ионов. Было указано на возможность использования ФЛП как источника пучков отрицательно заряженных ионов с энергиями в десятки кэВ (не менее 35 кэВ).

В первой части **четвертой главы** диссертационной работы показано, что использование дополнительного лазерного импульса наносекундной длительности с плотностью энергии до 10 Дж/см^2 , опережающего фемтосекундный лазерный импульс на 0.01 – 100 мс, позволило эффективно очищать поверхность мишени за счет удаления с нее молекул, содержащих водород, углерод и кислород. Поскольку углеводородные соединения (в частности) отличаются низкой термической устойчивостью, то нагрев поверхностного слоя мишени приводит к активации процессов десорбции примесного слоя, чему способствует помещение мишени в вакуум. В отличие от непрерывного теплового нагрева поверхности лазерная импульсная очистка обеспечивает большие температуры нагрева и может эффективно применяться для любых твердотельных мишеней как в режиме тепловой, так и плазменной очистки (необходимой для удаления более термостойких соединений – например оксидов). Сравнение экспериментально измеренных массовых спектров ионов плазмы для загрязненной и очищенной мишени кремния приведены на рис 5.

Так, за счет импульсной лазерной очистки, нам удавалось снизить долю примесей на поверхности кремниевой мишени до величины не более 0.5%. Аналогичная величина для титановой мишени оказалась несколько выше и составила ~2%. Измерение энергетических спектров в первой части четвертой главы не проводилось.

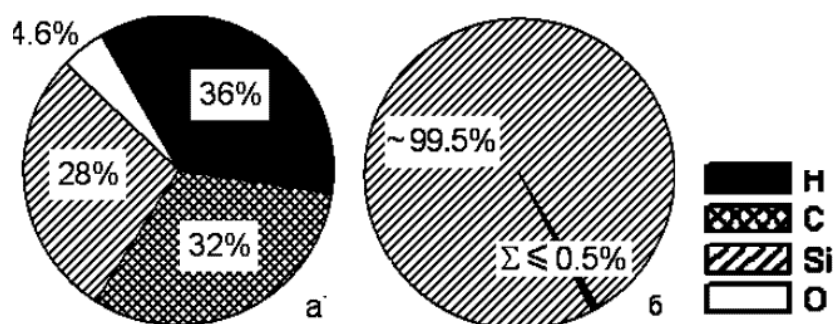


Рис.5. Массовые спектры ионов до (а) и после (б) лазерной очистки.

Результаты спектрометрических исследований, описанные во второй части четвертой главы, показали, что применение импульсной лазерной очистки приводит к появлению дополнительной высокоэнергетической компоненты в спектре ионов основного материала мишени в формируемой лазерной плазме. Действительно, в условиях присутствия “легкого” поверхностного слоя “тяжелые” ионы основного материала мишени в значительной степени экранируются от действия амбиполярного электрического поля горячей электронной компоненты протонами плазмы (в частности). В результате именно протоны набирают скорости, сравнимые с ионнозвуковой скоростью соответствующей горячей электронной компоненте. Этому способствует два обстоятельства: 1) примесный слой естественным образом располагается в поверхностном слое мишени, 2) ионизовать за счет какого-либо механизма “легкие” атомы (H, C) до того же отношения M/Q оказывается проще, нежели “тяжелые” атомы основного материала мишени.

В ходе экспериментов по импульсной лазерной очистке производилось варьирование её параметров (времени задержки между импульсами и величины плотности потока энергии греющего излучения). В результате было выяснено, что для качественной очистки мишени титана (доля примесей не более 2%), необходима плотность потока энергии 5-10 Дж/см²; для кремния – 1-3 Дж/см². Роль параметра задержки между импульсами оказалась ещё более существенной, чем роль плотности потока энергии. Так, при задержке в 100мкс наблюдаются ионы кремния с зарядом до 12+. Уменьшение этого параметра до 400нс привело к падению максимального регистрируемого заряда до 2+. Уточним, что в случае неочищенной мишени возможна регистрация ионов с зарядом до 5+. Существенное падение среднего, а также максимального заряда ионов в случае уменьшения времени задержки по всей видимости связано с образованием плазмы под действием предимпульса (преплазмы). При этом разлет плазмы основного импульса осуществляется в преплазму, что ведет к подавлению известного эффекта замораживания ионизационного состояния.

Наконец третьим параметром, определяющим характеристики ионного тока из плазмы, является контраст фемтосекундного импульса. Уменьшение

энергетического контраста также приводит к падению среднего и максимального заряда в плазме. Это позволило утверждать, что предимпульс может выполнять функции импульсной лазерной очистки с предельно малым временем задержки между чистящим и основным импульсами.

Таким образом, в заключительной главе диссертации было показано, что управление параметрами лазерной очистки, а также управление параметрами самого фемтосекундного импульса, формирующего плазму является эффективным инструментом для формирования плазмы с заданными параметрами ионных токов, такими как средний и максимальный заряд ионов, максимальная энергия ионов основного материала мишени и пр.

Основные результаты и выводы

1. В рамках диссертационной работы на основе времяпролетного масс-спектрометра электростатического поля был создан экспериментальный комплекс, позволяющий осуществлять корпускулярную диагностику заряженных частиц из лазерной плазмы формируемой на поверхности твердотельной мишени фемтосекундным лазерным импульсом субрелятивистской интенсивности (до $\sim 10^{17}$ В/см²) в условиях окружающего мишень вакуума не хуже 10^{-4} Торр. Диагностическая установка обеспечивает регистрацию заряженных частиц с энергиями в диапазоне от 100эВ до 47кэВ (в расчете на единицу заряда). Чувствительность анализатора обеспечивает регистрацию частиц, в том числе и в одиночном режиме (что достигается благодаря усилению сигнала в пористой структуре детектора на основе МКП с коэффициентом усиления вплоть до 10^7 - 10^8)

Определенная в ходе калибровочных измерений величина разрешающей способности масс-анализатора по энергиям составила $r_E = 12 \pm 0.5$, а разрешающая способность по массам $r_m = 10 \pm 0.5$. Это в частности позволяет отдельно детектировать такие ионы, как Fe^{4+} и Fe^{5+} . Калибровочные измерения позволили также определить величину так называемого “энергетического параметра масс-спектрометра” ($k = 4.25 \pm 0.1$ эВ/В), (необходимого для измерения энергетических спектров частиц из лазерной плазмы); а также измерить спектральную чувствительность анализатора к электронному току в диапазоне до 15 кэВ. Полученная зависимость с высокой точностью может быть аппроксимирована функцией $s(E) = 1 + (E^2 + 1/2)^{-1}$, в которой энергия электронов имеет размерность [кэВ]. Зависимость коэффициента усиления детектора ВЭУ-7 от напряжения питания, приложенного к нему, была найдена равной $Y(U) = 500 \cdot U^{12 \pm 0.5}$, где размерность U - [кВ].

В дальнейшем созданная экспериментальная установка может быть успешно использована в экспериментах по диагностике как ионного, так и электронного токов из фемтосекундной лазерной плазмы. Написанный пакет

программного обеспечения позволяет осуществлять обработку данных регистрируемых масс-спектрометром с высокой степенью автоматизации.

2. В работе были измерены энергетические массовые, а также зарядовые спектры ионов из ФЛП формируемой сверхинтенсивным лазерным импульсом. При этом в качестве мишеней использовался широкий круг материалов: Si, Fe, Ti, DKDP. В процессе эксперимента производилось варьирование как условий формирования лазерной плазмы (интенсивность излучения, его контраст, использование дополнительного чистящего предимпульса), так и условий диагностики (изменение знака заряда регистрируемых частиц).

В ряде случаев (в частности для H^{1+} , C^{5+} , C^{6+}) полученные данные хорошо согласуются с результатами различных теоретических моделей, предсказывающих как зарядовые распределения ионов плазмы на длине разлета порядка 60 см, так и значения их характерных энергий, в условиях интенсивности лазерного импульса на уровне 10^{16} Вт/см². Так, энергия, оцененная по формуле для ионнозвуковой скорости ($\sim\sqrt{3Z \cdot T_e/M}$), составила $\sim 10-100$ кэВ, а значения в эксперименте, оказались равными 9 кэВ и 40 кэВ соответственно для H^{1+} и C^{6+} . С другой стороны, предсказанная в 1-й главе диссертации полная ионизация ионов углерода, на самом деле успешно наблюдалась в эксперименте. Для ионов углерода, кислорода, кремния, железа, титана, фосфора и калия, значения среднего заряда регистрируемых ионов оказалось равным 3 ± 1 , а максимального 5-6. Средняя энергия наиболее быстрых ионов плазмы равнялась ~ 9 кэВ в расчете на единицу заряда.

Также в работе было отмечено непротиворечивость энергетических спектров ионов с электронными энергетическими спектрами плазмы.

3. Впервые путем прямого измерения энергетического спектра электронов из фемтосекундной лазерной плазмы формируемой на твердотельной поверхности мишени импульсами с интенсивностью порядка 10^{16} Вт/см² подтверждено присутствие двух энергетических компонент, соответствующих тепловым и горячим электронам. Полученный в эксперименте энергетический спектр был успешно аппроксимирован двойным экспоненциальным распределением с температурами соответственно равными $T_{th}=240 \pm 60$ эВ и $T_{hot}=14.4 \pm 4$ кэВ. При этом было установлено отсутствие зависимости профиля энергетического спектра, а также рассчитанных температур от типа материала мишени (Si, Ti и Fe). Приведенные значения не плохо согласуются с известными из литературы величинами рассчитанными численно. Так, в условиях интенсивности лазерного излучения $\sim 10^{16}$ Вт/см², оценка сверху для температуры тепловых электронов составила 500 эВ, а среднее значение температуры для горячих электронов оценивалось равным ~ 5 кэВ.

Измеренное количественное соотношение между горячей и тепловой электронными компонентами среди “убегающих” электронов составило $A = 0.7 \pm 0.3$.

4. Впервые в струе горячей фемтосекундной лазерной плазмы сформированной сверхинтенсивным лазерным импульсом на твердотельной поверхности мишени были зарегистрированы высокоэнергетичные однократно заряженные отрицательные ионы с максимальной энергией не менее 34 кэВ. Относительный выход отрицательных ионов при давлении в вакуумной камере на уровне 10^{-5} Торр составил значение $10^{-3} \leq \eta \leq 10^{-2}$, что существенно превышает величину, соответствующую полному ионизационному равновесию (например: $\eta \leq 10^{-17}$ для $T \sim 10 \text{ эВ}$ и $n_i \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$). При этом наличие углеводородных и оксидных примесей способствовало росту выхода отрицательных ионов. Формирование отрицательных ионов в расширяющейся лазерной плазме происходит в процессе перезарядки положительных ионов на молекулах остаточного газа в камере. Фактором, определяющим величину общего потока отрицательных ионов, является давление остаточного газа в камере. Было указано на возможность использования фемтосекундной лазерной плазмы как источника пучков отрицательно заряженных ионов с энергиями в несколько десятков кэВ (~ 30 кэВ и более).

5. Было показано, что присутствующий на поверхности мишени примесный слой, состоящий из углеводородов, окислов и паров воды, существенным образом модифицирует параметры ионного тока лазерной плазмы. Основные модификации заключаются в: изменении массового состава ионов плазмы, а также в том, что наибольшую энергию на единицу заряда иона приобретают легкие примесные элементы. Тем самым существенная доля лазерной энергии перераспределяется в кинетическую энергию примесных ионов.

Так, при формировании лазерной плазмы импульсами с интенсивностью в 10^{16} Вт/см^2 на поверхности неочищенной мишени в условиях окружающего мишень вакуума на уровне 10^{-5} Тор, доля примесных ионов составляет порядка $2/3$ среди всех ионов с энергией 100 эВ и выше. При этом максимальная энергия ионов основного материала не превышает 100 кэВ. Напротив, при использовании очищенной мишени максимальная энергия достигает 400 кэВ и более. Действительно, в условиях присутствия “легкого” поверхностного слоя “тяжелые” ионы основного материала мишени в значительной степени экранируются от действия амбиполярного электрического поля горячей электронной компоненты протонами плазмы. В результате именно протоны набирают скорости сравнимые с ионнозвуковой скоростью соответствующей горячей электронной компоненте. Этому способствует два обстоятельства: 1) примесный слой естественным образом располагается в поверхностном слое ми-

шени, 2) ионизовать легкие атомы (H, C) до тех же значений M/Q оказывается проще, нежели тяжелые атомы основного материала мишени.

6. Было показано, что импульсная лазерная очистка является эффективным инструментом удаления примесного и оксидного слоев с поверхности твердотельной мишени при давлении остаточного газа в вакуумной камере на уровне 10^{-5} Торр. Так, доля примесных ионов в плазме формируемой на неочищенной поверхности мишени кремния составляет порядка $2/3$ (для ионов с энергией не менее 100 эВ), а на очищенной с использованием греющего излучения Хе-С1 лазера – не более 0.5%. При этом оптимальными условиями лазерной очистки являются: плотность энергии очищающего импульса ~ 3 Дж/см² (для Si), и 5-7 Дж/см² (для Ti), задержка между импульсом очистки и фемтосекундным импульсом ~ 100 мкс. Показано, что условие использования импульсной лазерной очистки является необходимым для формирования высокоэнергетических моноатомных ионных пучков. В целом, управление параметрами лазерной очистки, а также управление параметрами самого фемтосекундного импульса формирующего плазму (его энергетическим контрастом) является эффективным инструментом для формирования плазмы с заданными параметрами ионных токов, такими как средний и максимальный заряд ионов, максимальная энергия ионов основного материала мишени и пр. Так, в частности, при задержке в 100мкс нам удалось наблюдать ионы кремния с зарядом до 12+. Уменьшение этого параметра до 400нс привело к уменьшению максимального регистрируемого заряда до 2+.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

- 1 Chutko O.V., Gordienko V.M., Lachko I.M., Mar'in B.V., Savel'ev A.B., Volkov R.V., "High-energy negative ions from expansion of high-temperature femtosecond laser plasma", *Appl.Phys.B*, **77**, 831-837 (2003).
- 2 Gordienko V.M., Lachko I.M., Rusanov A.A., Savel'ev A.B., Uryupina D.S., Volkov R.V., "Enhanced production of fast multi-charged ions from plasmas formed at cleaned surface by femtosecond laser pulse", *Appl. Phys. B*, **80**, 733-739 (2005).
- 3 Волков Р.В., Гордиенко В.М., Лачко И.М., Михеев П.М., Мар'ин Б.В., Савельев А.Б., Чутко О.В., "Генерация высокоэнергетических отрицательных ионов водорода при взаимодействии сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения с твердыми мишенями", *Письма в ЖЭТФ*, **76**, 171-175 (2002).
- 4 Волков Р.В., Гордиенко В.М., Лачко И.М., Савельев А.Б., Урютина Д.С., "Ускорение тяжелых многозарядных ионов до энергии в 1 МэВ при облучении

- очищенной твердотельной мишени фемтосекундным лазерным излучением с интенсивностью 10^{16} Вт/см²”, Письма в ЖЭТФ, **81**, 708-711 (2005).
- 5 Волков Р.В., Голишников Д.М., Гордиенко В.М., Джиджоев М.С., Лачко И.М., Марьин Б.В., Михеев П.М., Савельев А.Б., Урюпина Д.С., Шашков А.А., “Формирование ионного тока высокотемпературной фемтосекундной лазерной плазмы на поверхности мишени, содержащей примесный слой”, Квантовая электроника, **33**, 981-986 (2003).
- 6 Волков Р.В., Воробьев А.А., Гордиенко В.М., Джиджоев М.С., Лачко И.М., Марьин Б.В., Савельев А.Б., Урюпина Д.С., “Влияние импульсной лазерной очистки мишени на ионизацию и ускорение ионов в плазме, создаваемой фемтосекундным лазерным импульсом”, Квантовая Электроника, **35**, 953-958 (2005).
- 7 Gordienko V.M., Lachko I.M., Mikheev P.M., Savel'ev A.B., Uryupina D.S., Volkov R.V., “Experimental characterization of hot electrons production under femtosecond laser plasma interaction at moderate intensities”, Plasma Phys. Controlled Fusion, **44**, 2555-2568 (2002).
- 8 Chutko O.V., Gordienko V.M., Lachko I.M., Savel'ev A.B., Volkov R.V., “High-energy negative ion formation in the femtosecond laser plasma plume owing to charge exchange with residual gas molecules”, Laser Physics, **14**, 455-461 (2004).
- 9 Волков Р.В., Гордиенко В.М., Лачко И.М., Русанов А.А., Савельев А.Б., Урюпина Д.С., “Формирование быстрых многозарядных тяжелых ионов при воздействии сверхинтенсивного фемтосекундного лазерного импульса на очищенную поверхность мишени”, ЖЭТФ, **103**, 347-362 (2006).
- 10 Chutko O.V., Gordienko V.M., Lachko I.M., Savel'ev A.B., Tkalya E.V., Volkov R.V., “Internal electronic conversion decay of low-energy nuclear levels excited in hot dense femtosecond laser plasma”, Proc. SPIE, **4752**, 205-216 (2002), ICONO 2001: Ultrafast Phenomena and Strong Laser Fields; Vyacheslav M. Gordienko, Anatoly A. Afanas'ev, Vladimir V. Shuvalov, Eds.
- 11 Chutko E.A., Gordienko V.M., Kirillov B.A., Lachko I.M., Magnitskii S.A., Savel'ev A.B., Shashkov A.A., Volkov R.V., “Self-channeling of femtosecond visible laser pulse with microjoule energy and micromodification in transparent target”, Proc. SPIE, **5121**, 126-133 (2003), laser processing of advanced materials and laser microtechnologies; Friedrich H. Dausinger, Vitali I. Konov, Vladimir Y. Baranov, Vladislav Y. Panchenko; Eds.
- 12 Lachko I.M., Volkov R.V., Golishnikov D.M., Gordienko V.M., Dzhidzhoev M.S., Mar'in B.V., Mikheev P.M., Savel'ev A.B., Uryupina D.S., Shashkov A.A., “Control of femtosecond laser plasma parameters by surface contaminants cleaning with preceding pulse laser”, Proc. SPIE, **5482**, 102-111 (2004), Laser Optics-2003: Superintense Light Fields and Ultrafast Processes; Vladimir E. Yashin, Alexandr A. Andreev; Eds.

-
- 13 *Savel'ev A.B., Gordienko V.M., Lachko I.M., Rusanov A.A., Uryupina D.S., Volkov R.V.*, “Enhanced ionization of W ions at a plasma-vacuum boundary in femtosecond laser plasma at moderate intensities”, Proc. SPIE, **5975**, 597506-597517 (2006), Topical problems of nonlinear wave physics; Alexander M.Sergeev; Eds.
- 14 *Lachko I.M., Vorob'ev A.A., Gordienko V.M., Dzhidzhoev M.S., Mar'in B.V., Savel'ev A.B., Uryupina D.S., Volkov R.V.*, “Production of high-energy multi-charged mono-atomic ion bunches from FLP: The role of pulsed laser pre-cleaning”, Proc. SPIE, **6053**, 605310-605317 (ICONO/LAT-2005: High-Power Lasers and Applications, May 11-17 (2006), St. Petersburg, Russia); Willy L. Bohn, Vladimir S. Golubev, Andrey A. Ionin, Vladislav Y. Panchenko, Eds.
- 15 *Uryupina D.S., Gordienko V.M., Lachko I.M., Rusanov A.A., Savel'ev A.B., Volkov R.V.*, “On the origin of fast multi-charged ions from femtosecond laser plasma interaction at moderate intensities”, Proc. SPIE, **6256**, 62560G (ICONO 2005: Ultrafast Phenomena and Physics of Superintense Laser Fields; Quantum and Atom Optics; Engineering of Quantum Information, May 11-17 (2006) St. Petersburg, Russia) Hans A. Bachor, Andre D. Bandrauk, Paul B. Corkum, Markus Drescher, Mikhail Fedorov, Serge Haroche, Sergei Kilin, Alexander Sergienko, Eds.

