Учреждение Российской академии наук
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

На правах рукописи

Фроня Анастасия Андреевна

Экспериментальное исследование взаимодействия низкокогерентного лазерного излучения с мишенями различной структуры

Специальность: 01.04.21 — Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2011

Работа выполнена в Лаборатории воздействия лазерного излучения Отдела лазерного термоядерного синтеза Отделения квантовой радиофизики Учреждения Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Стародуб Александр Николаевич

Официальные оппоненты: член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Гаранин Сергей Григорьевич (РФЯЦ ВНИИЭФ)

член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Пашинин Павел Павлович (ИОФ РАН)

Ведущая организация: Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова

Защита состоится "___"____________2011 г. на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при Учреждении Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр., д. 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

Автореферат разослан "___" ____________ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук Шиканов А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В настоящее время весьма актуальной задачей является изучение свойств материалов, подвергающихся воздействию концентрированных потоков лазерной энергии. Воздействие таких потоков с плотностью мощности от 10^9 Вт/см^2 на вещество приводит к поглощению части падающей энергии и к образованию плазменного источника, характеристики которого определяются как параметрами лазерного излучения, так и свойствами исследуемого вещества. Изучение процессов, протекающих при таком взаимодействии, важно как для фундаментальной, так и прикладной науки.

Изменение условий взаимодействия расширяет круг исследовательских возможностей и может достигаться несколькими способами, например, формированием лазерного излучения с новым комплексом параметров или созданием новых материалов.

Развитие технологий производства материалов с заданной структурой и плотностью позволило получать пористые плёнки с объёмной плотностью 1 – 100 мг/см^3 [1]. Изучение физических процессов, происходящих в плазме, возникающей при воздействии лазерного излучения на подобные материалы, представляет большой интерес с точки зрения изучения физики взаимодействия мощных потоков лазерного излучения с веществом. Так, например, малоплотные объемноструктурированные материалы используются в таких перспективных фундаментальных научных направлениях, как физика высоких плотностей энергии, лазерный термоядерный синтез, моделирование в лабораторных условиях астрофизических явлений [2, 3]. Также исследуются возможности их применения в прикладных задачах, например, в конструкциях мишеней для лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) [1].

При взаимодействии лазерного излучения с веществом задача повышения кпд лазера, эффективности транспортировки и передачи энергии греющего излучения плазме является существенной и актуальной.

Процессы рассеяния, протекающие в плазме, приводят к потере части энергии греющего излучения, что влияет на процесс передачи энергии лазерного излучения мишени. По этой причине важной задачей является всестороннее исследование процессов рассеяния в лазерной плазме, в частности, изучение спектральных, временных, пространственных, энергетических характеристик рассеянного излучения. С другой стороны, изучение рассеяния в плазме является эффективным диагностическим инструментом, позволяющим определять такие параметры плазмы как плотность, температура, скорость разлёта и т.д.

Важным вопросом, который необходимо решать при взаимодействии мощного лазерного излучения с веществом, является равномерность распределения энергии по поверхности облучаемой мишени, что также влияет на эффективность передачи лазерной энергии плазме. Кроме того, однородность облучения мишени играет важную роль в ЛТС и необходима для достижения оптимального сжатия вещества. Например, для выравнивания неоднородностей интенсивности лазерного излучения, приходящего на мишень, было предложено использовать метод динамической плазменной фазовой пластины [4]. При этом важна оптическая прозрачность плазменного факела (слоя), что может быть достигнуто, например, использованием малоплотных материалов.

Характер взаимодействия лазерного излучения с веществом определяется не только свойствами используемых веществ (материалов), но и, как указано выше, параметрами лазерного излучения. Создание лазерных систем с управляемой степенью когерентности излучения является самостоятельной важной и актуальной задачей. Так временная когерентность существенно влияет на коэффициент усиления сигнала, распространяющегося в активной среде. Именно этот факт используется при усилении и формировании высокоинтенсивных фемтосекундных импульсов (см., например, [5-7]). С другой стороны, в работе [8] было показано, что уменьшение степени пространственной когерентности лазерного пучка приводит к подавлению мелкомасштабной самофокусировки излучения в оптической среде лазера. Управление когерентностью позволяет повысить кпд лазерной системы при упрощенных требованиях к оптической схеме усилительной системы. При использовании в ЛТС многопучковой схемы облучения мишени существуют трудности в достижении однородного распределения интенсивности лазерного излучения на мишени, причиной которых является интерференция высококогерентного излучения перекрывающихся лазерных пучков. Данную задачу решают различными способами [например, 9], один из которых использование низкокогерентого лазерного излучения. Согласно [8] лазерная система с низкокогерентным излучением может быть оптимальным кандидатом в драйверы энергетических установок.

Поэтому исследование взаимодействия низкокогерентного лазерного излучения с малоплотными объемноструктурированными материалами, а также с материалами твердотельной плотности является актуальной задачей.

Цель диссертационной работы – экспериментально исследовать процесс взаимодействия низкокогерентного лазерного излучения с материалами различной плотности. На основе диагностических данных по рассеянию, поглощению и прохождению низкокогерентного греющего лазерного излучения через плазму малоплотных объемноструктурированных материалов и материалов твердотельной плотности охарактеризовать возникающую плазму и процессы, протекающие в ней, а также провести сравнение экспериментальных результатов.

Реализация намеченной цели предусматривала решение следующих задач:

- проведение экспериментов по изучению энергетических, спектральных, пространственных, временных характеристик излучения рассеянного плазмой малоплотных материалов, твердотельных мишеней назад и по направлению распространения греющего лазерного излучения;

- изучение распределения интенсивности лазерного излучения, проникающего через слой плазмы, образованной при воздействии этого лазерного излучения на малоплотный материал;

- анализ экспериментальных данных с целью выявления особенностей процессов рассеяния, поглощения в плазме малоплотных объемноструктурированных материалов, процесса проникновения греющего излучения через плазменный слой таких материалов;

- сравнительный анализ экспериментальных данных, полученных для малоплотных материалов и материалов твердотельной плотности.

Научная новизна работы:

Научная новизна определяется комплексом впервые выполненных исследований и полученных результатов, которые сводятся к следующему:

- проведены эксперименты по взаимодействию низкокогерентного лазерного излучения с малоплотными объемноструктурированными материалами и материалами твердотельной плотности;
- экспериментально исследованы диаграммы направленности излучения, прошедшего через плазму малоплотного объемноструктурированного материала;
- экспериментально продемонстрирована зависимость (увеличение) угла рассеяния излучения, рассеянного плазмой назад на основной частоте, от погонной массы мишени;
- экспериментально продемонстрировано проникновение значительной доли энергии греющего низкокогерентного излучения наносекундной длительности через созданный этим излучением плазменный слой малоплотного объемноструктурированного материала, имеющего структуру сетки, с подкритической и со сверхкритической объемной плотностью;
- экспериментально определены условия воздействия лазерного излучения на малоплотный объемноструктурированный материал, при которых достигается проникновение значительной части лазерного излучения;
- экспериментально выявлены зависимости энергии излучения, проходящего через плазму малоплотных материалов, от толщины, плотности, погонной массы используемых мишеней, от плотности мощности греющего излучения;
- для изучения изображения плазмы в собственном оптическом излучении разработана схема и создан прибор – четырехчастотный поляризационный микроскоп.

Научная и практическая ценность результатов

Данная диссертационная работа была направлена на получение информации о процессах, происходящих в плазме малоплотных объемностуктурированных мишеней и мишеней твердотельной плотности при воздействии низкокогерентного лазерного излучения, что имеет важное значение для физики взаимодействия лазерного излучения с веществом, для исследований процессов плазмообразования и проникновения лазерного излучения через плазму, а также для прикладных исследований в области ЛТС.

Выполненные эксперименты показывают, что малоплотные объемноструктурированные мишени могут использоваться для сглаживания пространственных неоднородностей пучка лазерного излучения при сохранении высокого коэффициента пропускания лазерного излучения.

Выявленные зависимости коэффициента пропускания лазерного излучения плазмой малоплотных мишеней из триацетата целлюлозы могут использоваться для выбора параметров мишени (плотность и толщина) и греющего лазерного излучения для достижения необходимой прозрачности плазмы.

Разработанный четырехчастотный поляризационный микроскоп может быть использован в исследованиях, где необходимо получать изображение светящихся и освещаемых объектов в оптическом диапазоне длин волн (0,4 - 1,1 мкм).

Положения, выносимые на защиту:

- Лазерное излучение низкой когерентности эффективно взаимодействует как с малоплотными материалами, так и с материалами твердотельной плотности. При взаимодействии лазерного излучения с твердотельными мишенями эффективность проявляется в высокой доле поглощенной энергии и низкой доле отраженной энергии. При взаимодействии лазерного излучения с малоплотными мишенями эффективность проявляется в высокой доле проникновения лазерной энергии и низкой доле отраженной энергии.

- При воздействии низкокогерентного лазерного излучения наносекундной длительности на малоплотный объемноструктурированный материал происходит нелинейное проникновение лазерной энергии через созданную таким образом плазму (как для мишеней с подкритической, так и со сверхкритической плотностью). После прохождения низкокогерентного лазерного излучения через плазму малоплотного материала из триацетата целлюлозы, имеющего структуру в виде объемной сетки, происходит перераспределение энергии в пучке лазерного излучения.

- Малоплотные объемноструктурированные мишени из триацетата целлюлозы с одинаковой погонной массой, но различной плотностью и толщиной при воздействии лазерного излучения низкой когерентности при идентичных параметрах лазерного излучения ведут себя одинаковым образом с точки зрения доли лазерной энергии, проникшей за плазменный слой этих мишеней, и направленности излучения, рассеянного плазмой этих мишеней на основной частоте.

- При воздействии на вещество (различной структуры и плотности) низкокогерентного лазерного излучения наносекундной длительности в созданной плазме возникают и развиваются процессы трансформации греющего излучения в плазменные волны, приводящие к поглощению и рассеянию лазерного излучения в плазме.

Публикации и апробация результатов работы

По теме диссертации опубликовано 24 работы, из которых 5 статей (3 из них в рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией России) и 19 публикаций в трудах конференций. Список основных публикаций приведен в конце автореферата. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях:

- Научная сессия МИФИ-2006, Москва, 2006;

- Демидовские чтения, Конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики», Москва, 2006;

- 6th Asia-Pacific Conference “Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics”, Harbin, 2006;

- 29^{th} European Conference on Laser Interaction with Matter, Madrid, Spain, 2006;

- Вторая международная молодежная школа «Современные проблемы лазерной физики», Московская область, 2006;

- 3^{d} International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology, Bangkok, 2007;

- V Самарский конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике, Самара, 2007;

- 30^{th} European Conference on Laser Interaction with Matter, Darmstadt, Germany, 2008;

- Молодежная школа-конференция «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства», Владимир, 2008;

- «Конференция-конкурс молодых физиков», Москва, 2009;

- 4^{th} International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology, Katmandu, Nepal, 2009;

- 8-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», Минск, Беларусь, 2009;

- 2-ая Международная конференция/молодёжная школа-семинар «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства», Владимир, 2009;

- VII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, Самара, 2009;

- Научная сессия МИФИ-2010, Москва, 2010;

- «Конференция-конкурс молодых физиков», Москва, 2010;

- 31^{st} European Conference on Laser Interaction with Matter, Budapest, Hungary, 2010.

Личный вклад автора

Диссертация представляет итог самостоятельной работы автора, обобщающий полученные им и в соавторстве результаты. Автор диссертационной работы принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке методик проведения экспериментальных исследований, проведении эксперимента, а также обработке и обсуждении полученных результатов.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным характером проводимых исследований взаимодействия лазерного излучения с веществом. На экспериментальной установке была выполнена предварительная калибровка и настройка используемого оборудования. Достоверность также обусловлена применением современного программного обеспечения и методов обработки результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, основной части, содержащей три главы, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 101 страницу, включая 6 таблиц и 26 рисунков. Список литературных источников содержит 83 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, отмечена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, а также кратко излагается содержание диссертации.

Первая глава является обзорной, в ней представлен анализ современного состояния исследований по взаимодействию лазерного излучения с веществом в целом. В главе даны представления о современных направлениях в исследованиях по изучению лазерной плазмы, одним из которых является изучение процессов, протекающих в плазме малоплотных материалов при воздействии на них лазерного излучения. Обсуждаются существующие теоретические представления о процессах, происходящих в лазерной плазме, и представления об оптической диагностике лазерной плазмы. В главе излагаются литературные данные по экспериментальным исследованиям взаимодействия лазерного излучения с малоплотными материалами, анализируется экспериментальные результаты по изучению рассеянного плазмой излучения и излучения, прошедшего через плазму. Глава завершается постановкой задач, решаемых в диссертационной работе.

Во второй главе диссертационной работы приведено описание экспериментальной техники проведенных исследований. **Параграф 2.1** посвящен описанию экспериментальной установки «Канал-2» [8], на которой были выполнены все эксперименты по взаимодействию низкокогерентного лазерного излучения с веществом. Лазерная установка состоит из лазера, включающего в себя задающий генератор и систему формирования лазерного импульса, и камеры взаимодействия, внутри которой располагается исследуемый образец материала (мишень). В **параграфе 2.2** описан использованный в выполненных экспериментах диагностический комплекс. В **параграфах 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7** даны характеристики диагностических методик и принципы работы следующих диагностических каналов, используемых в экспериментах: канал спектральной диагностики в диапазоне 0,4 – 1,1 мкм; канал для изучения диаграммы направленности излучения, рассеянного плазмой; калориметрическая система; канал для изучения временного поведения рассеянного плазмой излучения; четырёхчастотный поляризационный микроскоп.

В **параграфе 2.7** описывается конструкция разработанного четырехчастотного поляризационного микроскопа, также приводится алгоритм калибровки регистрирующего элемента микроскопа и продемонстрированы результаты определения разрешающей способности микроскопа для четырёх длин волн (1,06, 0,71, 0,53, и 0,42 мкм). Проведенные измерения показали, что экспериментально определенное пространственное разрешение на всех используемых длинах волн не хуже 12 мкм, а астигматизм и хроматические аберрации в заданном диапазоне длин волн отсутствуют. Все четыре изображения, получаемые с помощью микроскопа, эквивалентны и могут быть использованы для регистрации излучения плазмы на любой длине волны из спектрального интервала 0,4 – 1,1 мкм с сохранением качества изображения, пространственного разрешения и коэффициента увеличения.

В **третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований взаимодействия низкокогерентного лазерного излучения с малоплотными объемноструктурированными материалами и материалами твердотельной плотности, направленных на изучение спектральных, временных, пространственных и энергетических характеристик созданной плазмы.

В **параграфе 3.1** представлены характеристики изготовленных в Лаборатории термоядерных мишеней ФИАН малоплотных объемноструктурированных мишеней из триацетата целлюлозы (ТАЦ) ($C_{12}H_{16}O_8$), использованных в проведенных экспериментах. Такие мишени представляют собой пористые структуры с объёмной плотностью 1 – 100 мг/см^3. Пористая структура достигается хаотическим распределением волокон (нитей) в пространстве. Толщина таких мишеней может варьироваться от десятков микрон до нескольких миллиметров.

Параграф 3.2 посвящен экспериментальному изучению энергетических параметров плазмы. В общем случае для исходной схемы эксперимента баланс энергии при облучении плоской мишени одним пучком лазерного излучения представляется в виде:

$$E_l = E_{abs} + E_{bs} + E_{fs+tr} + E_s .$$

Здесь E_l - энергия греющего лазерного излучения, приходящего на мишень, E_{abs} - энергия, поглощенная мишенью, E_{bs} - энергия излучения, рассеянного назад в апертуру фокусирующей системы, E_{fs+tr} - энергия излучения, прошедшего через мишень и рассеянного вперёд, собранная в телесный угол канала регистрации, E_s - энергия излучения, рассеянного плазмой в иных направлениях и не регистрирующаяся в условиях проведенных экспериментов.

По результатам калориметрических измерений выявлена зависимость энергии, прошедшей через мишень (выраженной в долях от величины падающей лазерной энергии), от толщины (рис. 1а), плотности (рис. 1б) мишени и от погонной массы мишени (рис. 1в). Обнаружено, что величина энергии излучения, прошедшего через мишень, уменьшается при увеличении плотности и толщины мишени, а также её погонной массы.

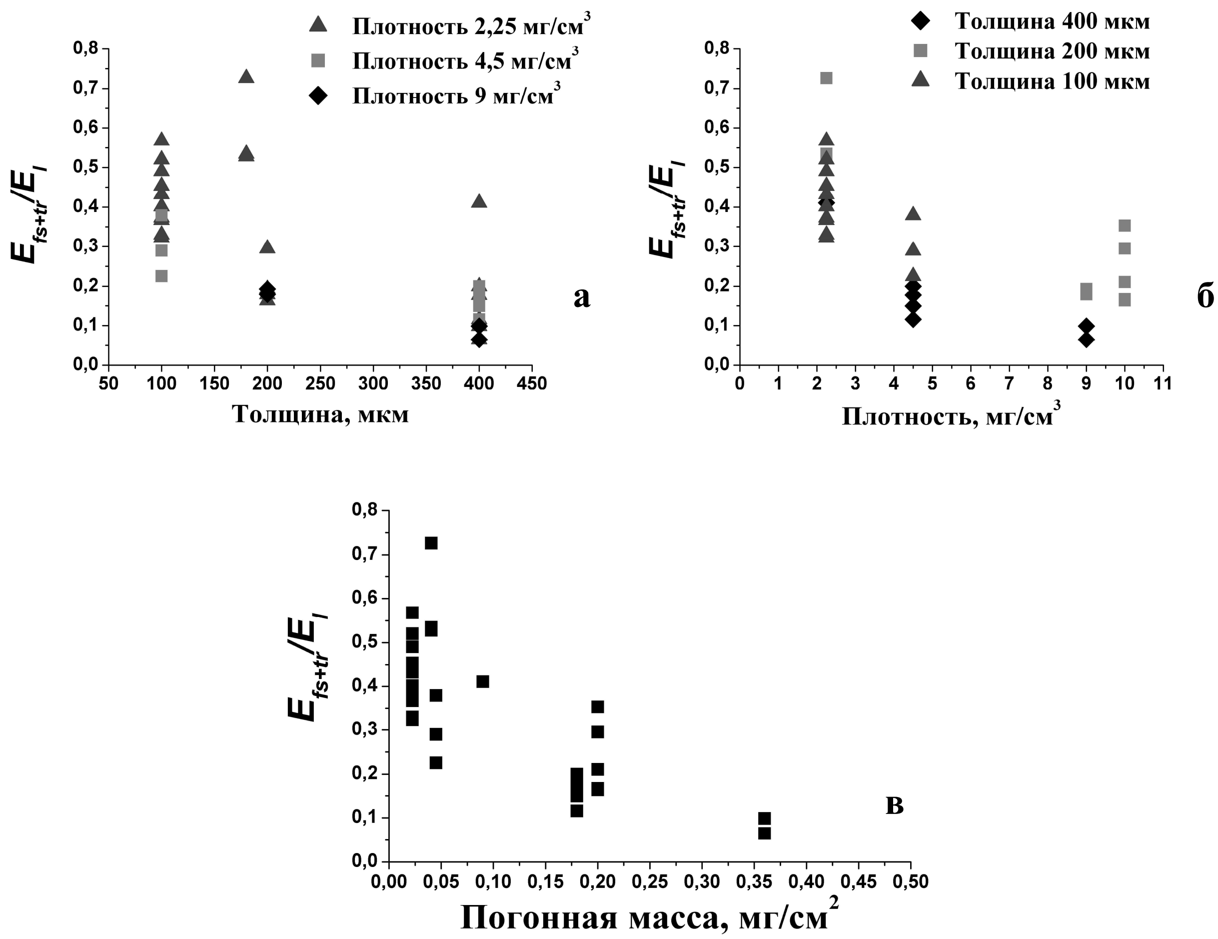


*Рис. 1. Зависимости отношения прошедшей энергии к энергии греющего излучения E_{fs+tr}/E_l от толщины (**а**), плотности (**б**) и погонной массы (**в**) мишени.*

Обнаружено, что для мишеней с одинаковыми плотностью и толщиной доля прошедшей энергии больше при меньшей плотности потока мощности лазерного излучения, а, следовательно, при меньшей энергии греющего излучения (см. рис. 2). Это приводит к тому, что для достижения требуемого коэффициента прозрачности создаваемой плазмы необходимо подбирать оптимальную величину энергии греющего лазерного излучения.

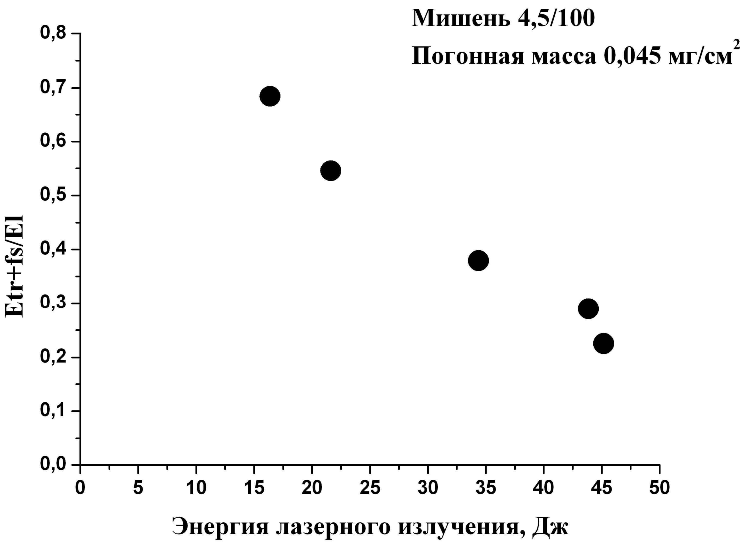


Рис. 2. Зависимости отношения прошедшей энергии к энергии греющего излучения E_{tr+fs}/E_l от величины энергии греющего излучения для мишени 4,5/100 (плотность/толщина).

Используя данные калориметрических измерений энергии падающего на мишень излучения, рассеянного назад и прошедшего через мишень излучения, была оценена энергия, равная: $\Delta E = E_l - E_{bs} - E_{fs+tr} = E_{abs} + E_s$. Выявлено, что эта энергия возрастает с увеличением погонной массы (рис. 3).

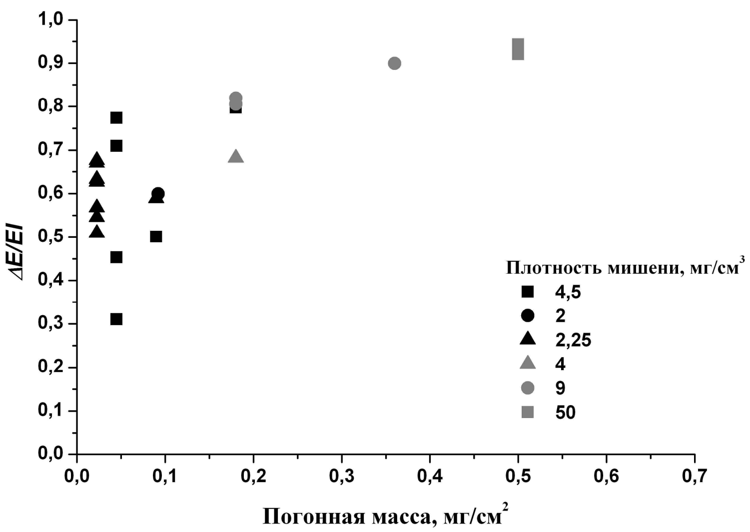


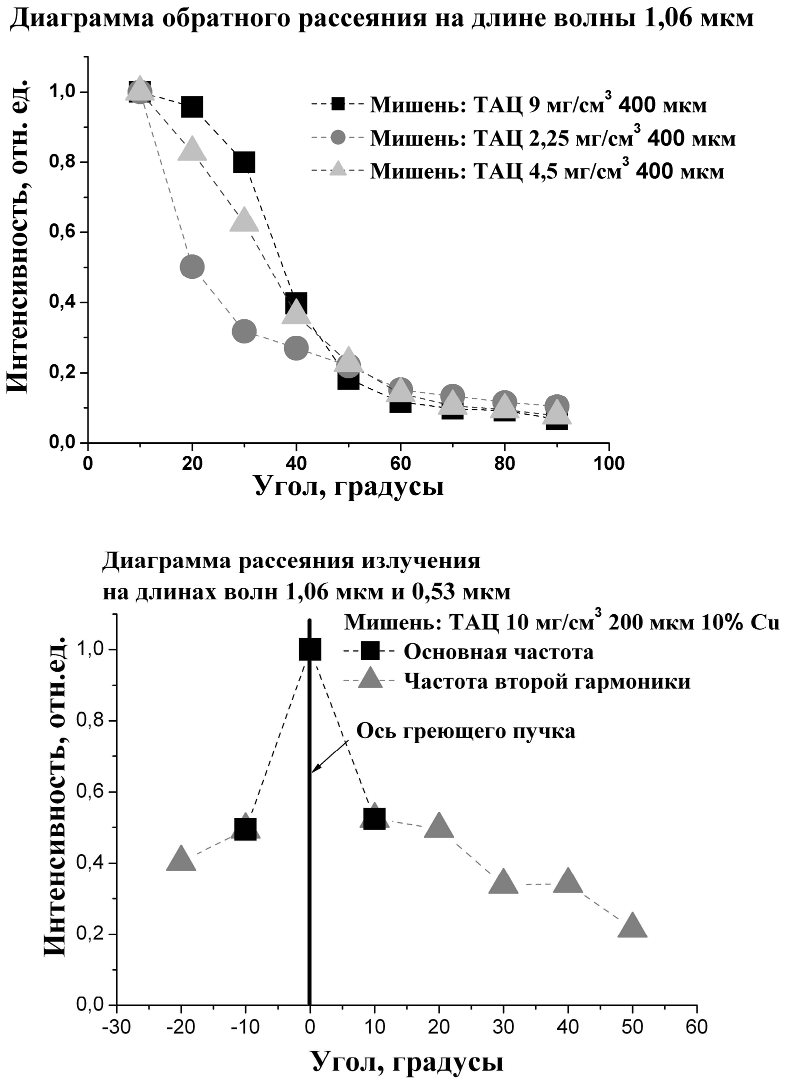
Рис. 3. Зависимость отношения $\Delta E/E_l$ от погонной массы мишени. Различные маркеры соответствуют различным плотностям мишеней.

Поскольку одной из составляющих ΔE является поглощенная мишенью энергия, то полученный вид зависимости $\Delta E(\rho l)$ объясняется увеличением общей массы вещества мишени, взаимодействующего с лазерным излучением, в котором происходит поглощение излучения лазерного импульса.

Эксперименты, выполненные при различных размерах пятна фокусировки лазерного излучения на мишени, позволили выявить, что в среднем при одинаковой энергии греющего излучения доля отраженной энергии больше при пятне фокусировки 170 мкм, чем при 350 мкм. Это означает, что при большей плотности потока мощности греющего излучения вклад в энергию отраженного от плазмы излучения от нелинейных процессов, происходящих в плазме, увеличивается.

В **параграфе 3.3** представлены результаты экспериментов по изучению диаграмм направленности излучения, рассеянного плазмой малоплотных объемноструктурированных мишеней. При изучении обратного рассеяния на основной частоте для ТАЦ мишеней была обнаружена зависимость угла рассеяния излучения от погонной массы мишени. При изменении погонной массы ТАЦ мишеней от 0,09 до 0,36 мг/см^2 наблюдалось увеличение угла, в котором происходит рассеяние основной части (80-90%) энергии (рис. 4а).

При изучении пространственно-углового распределения излучения, рассеянного вперёд, было обнаружено, что диаграмма направленности излучения на основной частоте фактически соответствует раствору угла падающего пучка (рис. 4б) и не зависит от параметров мишени (плотность, толщина, погонная масса). При регистрации излучения на частоте второй гармоники греющего лазерного излучения обнаружено, что рассеяние происходит диффузно в пространстве (рис. 4б).



а

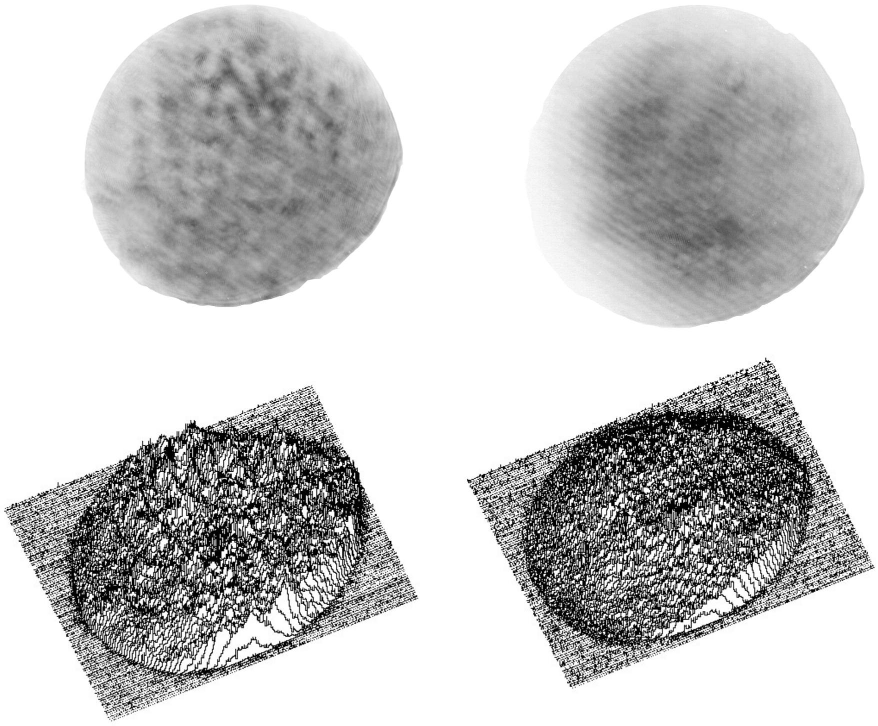
б

Рис. 4. Диаграммы рассеянного плазмой излучения. Рассеяние излучения плазмой на основной частоте назад ***(а)****, рассеяние вперед на основной частоте и частоте второй гармоники* ***(б)****.*

Параграф 3.4 посвящен описанию экспериментальных результатов, полученных с помощью четырехчастотного поляризационного микроскопа. По полученным фотографиям с изображениями плазмы в излучении на длинах волн 1,06, 0,71, 0,53, и 0,42 мкм, соответствующих излучению из плазмы, генерируемого на частотах ω_0, $3/2\omega_0$, $2\omega_0$, $5/2\omega_0$, были определены пространственные распределения интенсивности излучения (ω_0 – частота греющего излучения). Обнаружено, что области излучения на указанных частотах локализованы в пространственных областях, размеры которых различны, но близки к размеру фокального пятна. На основе размера светящейся области, абсолютной спектральной чувствительности и уровня сигнала приёмника оценено количество энергии, излученной на частотах гармоник $3/2\omega_0$, $2\omega_0$, $5/2\omega_0$ в телесный угол канала регистрации, а также коэффициенты трансформации греющего излучения в гармоники плазмы в телесный угол канала регистрации.

Наличие излучения на частотах дробных гармоник $3/2\omega_0$, $5/2\omega_0$ свидетельствует о протекании в плазме процесса двухплазмонного распада. Исходя из данных по величине коэффициента трансформации греющего излучения во вторую гармонику плазмы, полученных с помощью четырехчастотного поляризационного микроскопа, и учитывая схему регистрации диаграммы направленности излучения второй гармоники плазмы, сделан вывод, что диффузное распределение второй гармоники в пространстве является следствием развития в плазме параметрической турбулентности.

В **параграфе 3.5** проведено исследование пространственного распределения интенсивности лазерного излучения, прошедшего через плазму, образованную при воздействии этого излучения на малоплотную мишень. Показано, что мелкомасштабные неоднородности интенсивности, присутствующие в лазерном пучке, сглаживаются после прохождения через слой пенной плазмы (рис. 5). Сделано заключение, что такое сглаживание интенсивности происходит при оптимальной корреляции параметров лазерного излучения и параметров мишени и что такие мишени могут использоваться для перераспределения энергии лазерного излучения.



Без мишени
Энергия лазерного излучения 75 Дж

С ТАЦ мишенью
Энергия лазерного излучения 75 Дж
Энергия, прошедшая через мишень, 53 Дж

Рис. 5. Распределение интенсивности излучения в ближней зоне.

В **параграфе 3.6** представлены результаты экспериментов по изучению спектрального состава излучения рассеянного плазмой. Эксперименты показали, что в рассеянном излучении как назад, так и вперёд присутствуют компоненты на основной и удвоенной частоте греющего излучения. Как при рассеянии вперёд, так и при рассеянии назад ширина линии рассеянного излучения вблизи основной частоты увеличивается, а также изменяется положение максимума относительно частоты греющего излучения ω_0.

В спектре рассеянного вперёд излучения вблизи частоты второй гармоники $2\omega_0$ присутствует низкоинтенсивный максимум на фоне континуума, в то время как для рассеянного назад излучения вблизи частоты $2\omega_0$ характерно наличие двух максимумов на фоне континуума. Наличие такой структуры спектра второй гармоники объясняется двумя типами процессов, происходящих в плазме, а именно: линейной трансформацией лазерного излучения и развитием параметрических неустойчивостей.

На основе экспериментальных данных оценены пороговые значения плотности потока для развития в плазме параметрических неустойчивостей. Полученные значения свидетельствуют о том, что пороговое значение плотности мощности лазерного излучения преодолено для параметрического распада и в плазме малоплотных материалов существуют данные процессы.

Наличие излучения второй гармоники в спектре рассеяния плазмы указывает на формирование областей с критической плотностью в плазме, даже для мишеней с плотностью меньшей критической ($\sim 0{,}75 n_c$).

В **параграфе 3.7** обсуждаются экспериментальные данные по изучению временных характеристик излучения плазмы. Показано, что картина нелинейной прозрачности определяется конкретными условиями поглощения лазерной энергии и ее переноса, а также условиями формирования плазмы и ее динамикой.

В **параграфе 3.8** представлены результаты экспериментов по взаимодействию низкокогерентного лазерного излучения с мишенями твердотельной плотности и проведен сравнительный анализ с результатами, полученными для малоплотных мишеней. Анализ данных показал, что величины энергии, отраженной от плазмы, больше для мишеней твердотельной плотности, чем для малоплотных мишеней. Области свечения плазмы на частотах гармоник греющего излучения ω_0, $3/2\omega_0$, $2\omega_0$, $5/2\omega_0$, имеют размеры порядка размера пятна фокусировки и для твердотельных, и для малоплотных мишеней. Значения энергии рассеянного излучения на частотах $3/2\omega_0$, $2\omega_0$, $5/2\omega_0$, зарегистрированной в телесный угол диагностического канала, для твердотельных и малоплотных мишеней отличаются незначительно. В обоих случаях в спектре излучения, рассеянного назад плазмой, присутствуют компоненты на основной частоте и на частоте второй гармоники.

В заключении приводятся основные результаты, полученные при выполнении данной работы, а также формулируются выводы по результатам проведенных исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты выполненного исследования следующие:

1. Анализ экспериментальных данных по измерению баланса энергии показал, что доля отраженной энергии составляет $\leq$ 1% от энергии падающего лазерного излучения в апертуру фокусирующей линзы для всех типов используемых малоплотных и твердотельных мишеней. Обнаружено, что доля энергии, прошедшей через малоплотную мишень, может достигать 70% от энергии, падающей на мишень, как для мишеней с подкритической, так и со сверхкритической объемной плотностью.

2. Выявлена зависимость энергии, прошедшей через мишень, от плотности, толщины и погонной массы мишени, а также от энергии греющего излучения. Показано, что эта энергия уменьшается при увеличении выше указанных параметров мишени и лазерного излучения.

3. При изучении обратного рассеяния на основной частоте для ТАЦ мишеней обнаружена зависимость угла рассеяния излучения от погонной массы мишени. При изменении погонной массы от 0,09 до 0,36 мг/см^2 наблюдалось увеличение угла рассеяния, в котором сосредоточена основная доля (80-90%) рассеянной обратно энергии.

4. При изучении пространственного распределения излучения, прошедшего вперёд, обнаружено, что диаграмма направленности излучения на основной частоте фактически соответствует раствору угла падающего пучка и не зависит от параметров мишени.

5. Обнаружено, что рассеяние плазмой излучения на частоте второй гармоники в пространстве носит диффузный характер.

6. Продемонстрировано сглаживание интенсивности лазерного излучения при прохождении через плазму малолотного материала. Установлено, что это происходит при определенной корреляции параметров лазерного излучения и параметров малоплотной объемноструктурированной мишени.

7. Разработан четырехчастотный поляризационный микроскоп, позволяющий в одном выстреле в заданном направлении и с одинаковым

пространственным разрешением регистрировать изображения лазерной плазмы в излучении гармоник $2\omega_0$, $3/2\omega_0$, $5/2\omega_0$ и на частоте греющего излучения ω_0, оценивать энергию излучения в каждой из гармоник. Продемонстрирована работоспособность такого микроскопа в экспериментах по воздействию лазерного излучения на вещество.

8. Получены изображения областей свечения плазмы на частотах $2\omega_0$, $3/2\omega_0$, $5/2\omega_0$ и ω_0, на основании которых проведена оценка величины энергии рассеянной плазмой на этих частотах интегрально за всё время свечения. Определены размеры областей локализации гармоник, интенсивность их излучения и коэффициенты трансформации греющего излучения в гармоники. Размеры пятен, полученные при обработке изображений с микроскопа, свидетельствуют о том, что процесс генерации второй гармоники происходит в пространственной области, соответствующей размеру фокального пятна.

9. Изучение спектрального состава излучения, рассеянного плазмой, показало, что ширина линии рассеянного излучения на основной частоте (как обратно, так и по направлению падающего пучка) увеличивается, а также изменяется положение максимума спектрального распределения вблизи основной частоты ω_0. Наблюдаемое уширение спектра рассеянного излучения вблизи основной частоты связано с такими вынужденными процессами, как ВРМБ и ВКР. В ряде экспериментов наблюдалось значительное спектральное уширение вблизи основной частоты - вплоть до 200 Å.

На основании полученных результатов можно сделать выводы:

- Проведенные эксперименты продемонстрировали, что лазерное излучение низкой когерентности эффективно взаимодействует как с малоплотными материалами, так и с материалами твердотельной плотности. При взаимодействии лазерного излучения с твердотельными мишенями эффективность проявляется в высокой доле поглощенной энергии и низкой доле отраженной энергии. При взаимодействии лазерного излучения с малоплотными мишенями эффективность проявляется в высокой доле проникновения лазерной энергии и низкой доле отраженной энергии.

- Проникновение значительной доли энергии греющего излучения через плазменный слой малоплотного материала, наряду с данными по временной развертке излучения, прошедшего через плазму, свидетельствует о нелинейном механизме проникновения лазерного излучения.

- Установлено, что малоплотные материалы могут быть использованы для реализации метода динамической плазменной фазовой пластины с учётом полученного коэффициента пропускания энергии греющего излучения.

- Для всех плотностей мишеней зарегистрировано излучение на второй гармонике, что свидетельствует об образовании в плазме областей с критической плотностью электронов, даже в случае, когда изначальная плотность мишеней была подкритической.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Васин Б.Л., Кожевникова А.А. (Фроня А.А.), Малькова С.В., Осипов М.В., Стародуб А.Н., Федотов С.И. Методика измерения спектральной чувствительности ПЗС-матрицы на частоте Nd-лазера и его гармоник. Научная сессия МИФИ-2006. Москва 23-27 января 2006 года. Сборник научных трудов. 2006. Том 4. С. 273-274.

2. Васин Б.Л., Кожевникова А.А. (Фроня А.А.), Малькова С.В., Осипов М.В., Стародуб А.Н., Федотов С.И. Методика измерения спектральной чувствительности ПЗС-матрицы на частоте Nd-лазера и его гармоник. Демидовские чтения, Конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики». Москва. ФИАН. 25-28 февраля 2006 года. Тезисы докладов. 2006. С. 254-255.

3. S.I. Fedotov, Yu.V. Korobkin, A.A. Kozhevnikova (A.A. Fronya), B.V. Kruglov, S.V. Mal’kova, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, A.N. Starodub, V.B. Studenov, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Coherence of Laser Radiation and Laser-Matter Interaction. XXIX European Conference on Laser Interaction with Matter. Madrid. Spain. 2006. Book of abstracts. P. 200. Proceedings. P. 470-475.

4. A.N. Starodub, S.I. Fedotov, Yu.V. Korobkin, A.A. Kozhevnikova (A.A. Fronya), B.V. Kruglov, S.V. Mal’kova, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan,

B.L. Vasin, O.F. Yakushev “Interaction of Partially Coherent Laser Radiation with Matter.” 6th Asia-Pacific Conference “Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics”, Harbin, September 12-14, 2006. Препринт ФИАН, 2006, № 30. Proceeding of SPIE “Fundamental problems of opto- and microelectronics” III. V. 6595. 65950A. (Mar 5). 2007.

5. Васин Б.Л., Малькова С.В., Осипов М.В., Стародуб А.Н., Федотов С.И., Фроня А.А. Применение ПЗС-матриц для изучения характеристик плазмы, нагреваемой излучением Nd-лазера. Вторая международная молодежная школа «Современные проблемы лазерной физики». Московская область, 10-13 октября 2006 г. Программа и тезисы докладов. М: МЛЦ МГУ. 2006. С. 9.

6. A.N. Starodub, S.I. Fedotov, A.A. Kozhevnikova (A.A. Fronya), B.V. Kruglov, S.V. Mal’kova, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Interaction of partially coherent laser radiation with plasma. 3^{d} International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology. Bangkok. March 5-9. 2007. Book of abstract.

7. А.А. Фроня, А.Т. Саакян. «Измерение спектральной чувствительности ПЗС-матрицы». V Самарский конкурс-конференция научных работ студентов и молодых исследователей по оптике и лазерной физике. Сборник конкурсных докладов. Самара. 2007. С. 37-42.

8. A.A. Fronya, D.B. Charelishvili, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, A.N. Starodub, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Interaction of Intensive Laser Radiation with Matter on Installation KANAL-2. 30th European Conference on Laser Interaction with Matter. August 31 – September 5, 2008. Darmstadt, Germany. Book of abstract. P. 43. Proceedings of the XXX ECLIM. September 2009. P. 28-29.

9. A.N. Starodub, N.G. Borisenko, A.A. Fronya, Yu.A. Merkuliev, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Optical Properties of Aerogel Foil Near Critical Plasma Density Irradiated with Wide-Spectrum Laser. 30th European Conference on Laser Interaction with Matter. August 31 – September 5, 2008. Darmstadt, Germany. Book of abstract. P. 57. Proceedings of the XXX ECLIM. September 2009. P. 53-54.

10. Борисенко Н.Г., Васин Б.Л., Меркульев Ю.А., Осипов М.В., Пузырев В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Фроня А.А., Якушев О.Ф. Изучение параметров плазмы, образуемой при взаимодействии высокоинтенсивного лазерного излучения с малоплотными микроструктурированными объектами. Молодежная школа-конференция «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства». 19-21 ноября 2008. Владимир. С. 51.

11. N.G. Borisenko, A.A. Fronya, Yu.V. Korobkin, Yu.A. Merkuliev, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, A.N. Starodub, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Investigation of laser-plasma interaction with high spatial resolution in a wide spectral range. 4th International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology. Kathmandu. April 6-10. 2009. Book of abstract. P. 78. Препринт ФИАН №13. 2009.

12. N.G. Borisenko, A.A. Fronya, Yu.A. Merkuliev, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, A.N. Starodub, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Aerogel foil plasma: forward-, backscattering and transmission of laser radiation. 4th International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology. Kathmandu. April 6-10. 2009. Book of abstract. P. 117. Препринт ФИАН №12. 2009.

13. A.A. Fronya, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, A.N. Starodub, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Nonlinear conversion of Nd-glass laser radiation into harmonics and their interaction with plasma. 4th International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology. Kathmandu. April 6-10. 2009. Book of abstract. P. 79. Препринт ФИАН №19. 2009.

14. Фроня А.А., Борисенко Н.Г., Васин Б.Л., Меркульев Ю.А., Осипов М.В., Пузырев В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Якушев О.Ф. Взаимодействие лазерного излучения с малоплотными объемно-структурированными средами. Материалы 8-ой Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». Минск, Беларусь. 23-25 сентября 2009. С. 54.

15. Борисенко Н.Г., Васин Б.Л., Меркульев Ю.А., Осипов М.В., Пузырев В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Фроня А.А., Якушев О.Ф. Диагностика плазмы наноструктурированных объектов. Материалы 2-й международной

конференции/молодёжной школы-семинара «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства»16-19 ноября 2009 г. Владимир. С. 162.

16. А.Г. Боровков, М.В. Осипов, А.Н. Стародуб, А.А. Фроня. Диагностический комплекс для исследования рентгеновского излучения лазерной плазмы. VII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике. Самара. 2009. Сборник тезисов. С. 10-11.

17. Фроня А.А., Борисенко Н.Г., Васин Б.Л., Меркульев Ю.А., Осипов М.В., Пузырёв В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н., Якушев О.Ф. Рассеяние излучения плазмой, образуемой при воздействии мощного лазерного излучения на малоплотные среды. Приложение к журналу «Физическое образование в вузах». Т. 15. №1. 2009. С. П56.

18. Фроня А.А., Борисенко Н.Г., Васин Б.Л., Меркульев Ю.А., Осипов М.В., Пузырев В.Н., Саакян А.Т., Стародуб А.Н. Якушев О.Ф. Особенности прохождения излучения через плазменный слой малоплотного микроструктурированного вещества. Приложение к журналу «Физическое образование в вузах», Т. 16. №1. 2010. С. П47.

19. А.Г. Боровков, Б.Л. Васин, М.В. Осипов, В.Н. Пузырев, А.Т. Саакян, А.А. Фроня, О.Ф. Якушев. Пространственные и временные характеристики лазерной плазмы. Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. Сборник тезисов. 2010. Т.2. С.166.

20. A.A. Fronya, N.G. Borisenko, M.L. Chernodub, Yu.A. Merkuliev, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, A.N. Starodub, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. X-ray emission characteristics of foam target plasmas. 31st European Conference on Laser Interaction with Matter. 6 – 10 September, 2010. Budapest, Hungary. Book of abstract. P. 93.

21. V.N. Puzyrev, A.A. Fronya, M.V. Osipov, A.T. Sahakyan, A.N. Starodub, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Evolution of plasma emission on second harmonic frequency of Nd-glass laser radiation. 31st European Conference on Laser Interaction with Matter. 6 – 10 September, 2010. Budapest, Hungary. Book of abstract. P. 124.

22. Г.Л. Даниелян, М.В. Осипов, В.Н. Пузырёв, А.Т. Саакян, А.Н. Стародуб, С.И. Федотов, А.А. Фроня. Метод регистрации рассеянного плазмой лазерного излучения. Препринт ФИАН №25. Москва. 2007. Прикладная физика. №4. 2008. С.53.

23. Б.Л. Васин, С.В. Малькова, М.В. Осипов, В.Н. Пузырёв, А.Т. Саакян, А.Н. Стародуб, С.И. Федотов, А.А. Фроня, В.Г. Шутяк. Четырёхчастотный поляризационный микроскоп для регистрации изображения плазмы в диапазоне длин волн 0,4-1,1 мкм. Прикладная физика. №6. 2009. С.152.

24. A.N. Starodub, N.G. Borisenko, A.A. Fronya, Yu.A. Merkuliev, M.V. Osipov, V.N. Puzyrev, A.T. Sahakyan, B.L. Vasin, O.F. Yakushev. Aerogel foil plasma: forwardscattering, backscattering, and transmission of laser radiation. Laser and Particle Beams. Vol. 28. No. 3. P. 371-375. 2010.

ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

1. Borisenko N.G., Merkul’ev Yu.A., and Gromov A.I. Microheterogeneous targets a new challenge in technology, plasma physics, and laser interaction with matter. Journal of the Moscow Physical Society. 1994. Vol. 4. P. 247-273.

2. Koenig M., Benuzzi A., Philippe F., Batani D., Hall T., Grandjouan N., and Nazarov W. Equation of state data experiments for plastic foams using smoothed laser beams. Phys. Plasmas. Vol. 6. No. 8. 1999. P. 3296.

3. Remington B.A., Kane J., Drake R.P., Glendinning S.G., Estabrook K., London R., Castor J., Wallace R.J., Arnett D., Liang E., McCray R., Rubenchik A., and Fryxell B. Supernova hydrodynamics experiments on the Nova laser. Phys. Plasmas. Vol. 4. No. 5. 1997. P. 1994.

4. Воронич И.Н., Гаранин С.Г., Деркач В.Н., Зарецкий А.И., Кравченко А.Г., Лебедев В.А., Пинегин А.В., Сосипатров А.В., Сухарев С.А. Пространственно-временное сглаживание лазерного пучка с помощью динамической плазменной фазовой пластины. Квантовая электроника. Том 31. №11. 2001. С. 970-972.

5. Michael D. Perry and Gerard Mourou. Terawatt to Petawatt Subpicosecond Lasers. Science. Vol. 264. 1994. P. 917-924.

6. Blanchot N., Rouyer C., Sauteret C. and Migus A.. Amplification of sub-100-TW femtosecond pulses by shifted amplifying Nd:glass amplifiers: theory and experiments. Optics Letters. Vol. 20. No. 4. 1995. P. 395-397.

7. Rouyer C., Blanchot N., Allais I., Mazataund E., Miquel J.L., Nail M., Pierre A., Sauteret C. and Migus A.. Production and characterization of intensities above $2 \cdot 10^{19}$ W/cm^2, obtained with 30-TW 300-fs pulses generated in a Ti:sapphire/Nd-doped mixed-glass chain. Journal of the Optical Society of America B. Vol. 13. No. 1. 1996. P. 55-58.

8. Fedotov S.I., Feoktistov L.P., Osipov M.V., and Starodub A.N. Lasers for ICF with a Controllable Function of Mutual Coherence of Radiation. Journal of Russian Laser Research. Vol. 25. No. 1. 2004. P. 72-92. Препринт ФИАН №35, Москва 2002.

9. Журович М.А., Житкова О.А., Лебо И.Г., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Стародуб А.Н., Тишкин В.Ф.. Выравнивание абляционного давления в короне лазерной плазмы при нагреве мишеней для ЛТС. Квантовая электроника. 2009. 39. №6. С. 531-536.