

На правах рукописи

Журович Максим Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ АБЛЯЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ И
ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ С
ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ СЖАТИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ
МИШЕНЕЙ

Специальность 01.04.21. – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена на кафедре квантовой радиофизики Московского физико-технического института (государственного университета)

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук, доцент
Юрий Анатольевич Михайлов

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук
Игорь Корнелиевич Красюк
(Институт общей физики им. А.М. Прохорова (ИОФАН),
кандидат физ.-мат. наук
Константин Николаевич Кошелев
(Институт спектроскопии РАН (ИСАН)

Ведущая организация: Государственный научный центр
Российской Федерации Троицкий
институт инновационных и
термоядерных исследований
(ТРИНИТИ)

Защита состоится « 30 » октября 2009 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.156.07 Московского физико-технического института (государственного университета) по адресу:

141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского физико-технического института (государственного университета).

Автореферат разослан « 28 » сентября 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.156.07
кандидат физ.-мат. наук

С.М. Коршунов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Инерциальный лазерный термоядерный синтез (ЛТС) является одним из перспективных экологически чистых способов получения энергии, не основанных на использовании ограниченных природных запасов того или иного вида топлива. Основной задачей в развитии инерциального ЛТС является создание таких условий сжатия термоядерных мишеней, которые позволят получить нейтронный выход, достаточный для того, чтобы процесс стал энергетически эффективным.

Помимо технологической задачи создания чрезвычайно мощных многопучковых лазерных установок, в числе наиболее важных физических проблем в ЛТС на сегодняшний день можно назвать следующие:

- низкая однородность профиля абляционного давления, приводящая к развитию гидродинамических неустойчивостей, разрушающих сжатие мишени;
- предварительный прогрев ядра мишени, обусловленный переносом энергии внутрь мишени высокоэнергичными электронами.

Проблема с однородностью профиля абляционного давления связана главным образом с неравномерным распределением интенсивности лазерного излучения на поверхности мишени, в частности, из-за высокой когерентности лазерного излучения, которая приводит к образованию на облучаемой поверхности интерференционной картины в местах перекрытия сфокусированного лазерного излучения от разных каналов. При этом из-за развития гидродинамических неустойчивостей в процессе сжатия первоначально малые возмущения плотности и давления нарастают и, в конечном итоге, приводят к нарушению симметрии ускоряемой оболочки термоядерной мишени, и резкому снижению степени сжатия.

Одним из перспективных способов симметризации процесса абляции является использование предимпульса, т.е. создание дополнительного лазерного импульса, предшествующего основному. Предимпульс используется для создания высокотемпературной плотной плазмы, в которой благодаря поперечной теплопроводности будет происходить процесс симметризации неоднородностей нагрева сферической мишени. Следует отметить, что перспективность данного метода заключается в отсутствии каких-либо преобразований лазерного излучения, как в другие гармоники, так и в рентгеновское излучение, что является крайне важным ввиду отсутствия потерь энергии на конверсию излучения в гармоники и более высокой надёжности работы лазера.

Наряду с проблемой низкого сжатия вследствие неоднородности облучения, на этот процесс также оказывает существенное влияние предварительный прогрев глубинных слоев мишени. Этот эффект возникает по причине генерации в лазерной плазме электронов с энергией, намного превышающей тепловую энергию – так называемых «высокоэнергичных электронов». Даже небольшое их количество, несущее менее 1% от поглощенной лазерной энергии, при проникновении в центральную область мишени, может катастрофически снизить её сжатие.

Следует также отметить, что помимо отрицательной роли в ЛТС генерация высокоэнергичных электронов в лазерной плазме представляет практический интерес с точки зрения создания инжекторов пучков электронов с высокой энергией.

ЦЕЛИ РАБОТЫ

Данная работа посвящена исследованию двух важнейших для ЛТС физических процессов – сглаживанию профиля абляционного давления с помощью предимпульса и исследованию механизма генерации высокоэнергичных электронов в лазерной плазме.

Основными целями настоящей работы являются:

- Создание программы для ЭВМ, позволяющей производить моделирование неоднородного излучения в одноканальном лазере и получение данных о структуре электромагнитного поля лазера (его напряженности и фазовой картине) вблизи фокальной плоскости.
- Проведение экспериментов, подтверждающих эффективность использования предимпульса с той же длиной волны, что и основное излучение, для симметризации процесса абляции лазерной термоядерной мишени. Поиск оптимальных параметров предимпульса: энергия предимпульса и задержка относительно основного импульса. Проведение численного моделирования процессов прогорания мишени с целью получения данных о динамике изменения плотности плазмы и однородности ее профиля при различных параметрах предимпульса
- Разработка модели стохастического ускорения электронов в лазерной плазме. Создание программы для численного моделирования процесса стохастического нагрева
- Получение данных о генерации высокоэнергичных электронов в процессе стохастического ускорения: траектории частиц, изменение энергии во времени, энергетический спектр. Исследование зависимости этих параметров от энергии лазерного излучения.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

- Впервые проведены эксперименты по исследованию симметризирующего эффекта предимпульса, имеющего ту же длину волны, что и основное излучение.
- Для различных энергий предимпульса и задержек относительно основного импульса получены данные об эффективности симметризации профиля абляционного давления при облучении тонких алюминиевых фольг

- Экспериментально установлено наличие оптимальной конфигурации предимпульса, т.е. оптимальных доли энергии для его формирования и временного интервала относительно основного импульса
- Доказана возможность использования метода двумерного численного моделирования, основанного на решении системы уравнений газовой динамики в эйлеровых цилиндрических координатах, для оптимизации абляционного сжатия мишеней в экспериментах с предимпульсом
- Разработана оригинальная модель стохастического ускорения электронов в лазерной плазме с целью исследования генерации высокоэнергичных электронов в экспериментах по ЛТС

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Разработана программа, позволяющая моделировать амплитудно-фазовую картину неоднородного лазерного излучения вблизи фокуса сферической линзы
2. Проведены численные расчеты структуры электромагнитного поля с использованием данных экспериментального измерения интенсивности в фокальной плоскости Nd-лазера и проведено их сопоставление с экспериментом
3. Впервые проведены эксперименты по исследованию симметризирующего эффекта предимпульса, имеющего ту же длину волны, что и основное излучение. Получены данные о прогорании фольг, имитирующих оболочечные термоядерные мишени, для различных конфигураций предимпульса
4. Выявлено существование оптимальных параметров предимпульса: энергии и задержки относительно основного импульса
5. Показано качественное совпадение экспериментальных данных с теоретическими, что подтверждает возможность использования

описанного метода двумерного численного моделирования для оптимизации абляционного сжатия мишеней

6. Разработана модель стохастического ускорения электронов в лазерной плазме
7. Получены расчетные данные о динамике ускорения электронов в плазме, их траекториях и функциях распределения электронов по энергии в модели стохастического ускорения. Проведено качественное сравнение с результатами ранее проводившихся экспериментов и показана адекватность предложенной модели для объяснения экспериментальных результатов

НАУЧНАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

Разработанная программа для ЭВМ может быть использована для расчетов структуры электромагнитного поля вблизи фокуса при различной структуре падающего лазерного излучения.

Экспериментально показана возможность использования в установках инерциального лазерного термоядерного синтеза для симметризации абляционного давления схемы с предимпульсом, имеющим ту же длину волны, что и основной греющий импульс. На основании полученных результатов могут подбираться оптимальные параметры предимпульса (энергия, задержка относительно основного импульса) для лазерных установок на Nd-стекле.

Разработанная модель стохастического ускорения электронов в лазерной плазме позволяет рассчитывать динамику ускорения и энергетические спектры электронов для различных конфигураций облучения мишени лазером. Это дает широкие возможности для понимания и контроля процесса генерации высокоэнергичных электронов и может быть использовано как для борьбы с предпрогревом мишени в ЛТС, так и для создания эффективных источников

релятивистских электронов с высокими плотностью тока и направленностью для ускорителей.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные результаты диссертационной работы были представлены на научных конференциях МФТИ (Москва, 2004, 2007, 2008 гг.), на Российском научном форуме с международным участием «Демидовские чтения» (Москва, 2006), на 29-й Европейской конференции по взаимодействию лазерного излучения с веществом (Мадрид, 2006), на Международной конференции передовых достижений в физике и технике плазмы (Бангкок, 2007), на международной конференции «Х Харитоновские тематические научные чтения» (Саров, 2008)

ПУБЛИКАЦИИ

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ, из них 3 статьи в зарубежных журналах, 1 статья в российском журнале и 2 препринта ФИАН.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 89 страницах, содержит 31 рисунок. Список литературы насчитывает 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность рассмотренной задачи, формулируются основные цели и положения работы.

Первая глава посвящена численному моделированию структуры электромагнитного поля сфокусированного лазерного излучения.

В первом параграфе рассмотрена расчетная модель на основе принципа Гюйгенса-Френеля в формулировке Киргхофа. Сформулированная методика расчета была реализована в виде оригинальной программы для ЭВМ. Данная программа позволяет получать трехмерные матрицы с амплитудными и фазовыми характеристиками электромагнитного поля лазера вблизи фокуса сферической линзы. Эти данные впоследствии используются для моделирования различных физических процессов, происходящих в фокальной плоскости.

Во втором параграфе приведены результаты расчетов конфигурации поля при различной структуре падающего излучения и показана возможность качественного моделирования реальных экспериментальных условий.

В третьем параграфе сформулированы основные результаты данной главы.

Во **второй главе** предложен механизм симметризации абляционного давления в ЛТС путем введения предимпульса – импульса с меньшей энергией, предваряющего с определенной временной задержкой основной греющий импульс.

В первом параграфе на основе публикаций в литературе приведен обзор основных существующих на сегодняшний день методов симметризации абляционного давления – снижения когерентности лазерного излучения, применение малоплотных абляторов, использование предимпульса.

Во втором параграфе сформулирована постановка задачи в данной главе.

В третьем параграфе приведено описание экспериментальной установки «ПИКО» лаборатории лазерной плазмы ФИАН, на которой были получены основные результаты.

В основе установки лежит одноканальный лазер на стекле ГЛС-1, активированном ионами Nd^{3+} . Лазерное излучение фокусируется в мишенно-диагностической вакуумной камере, в которой располагаются образцы алюминиевой фольги, имитирующие оболочку термоядерной мишени.

Генерация лазерного излучения проводится в режиме модуляции добротности, длительность импульса на выходе генератора составляет 30 нс, полная энергия порядка 0.1 Дж, ширина спектра излучения $\delta\lambda \approx 30 \text{ \AA}$. Усиление импульса производится несколькими каскадами усилителей с вырезанием после первого каскада с помощью затвора Поккельса. На выходе импульс имеет длительность порядка 2 нс на полувысоте и энергию в интервале 2 – 30 Дж. Полученное излучение фокусируется в мишенной камере с помощью линзы с фокусным расстоянием $f = 10 \text{ см}$, что дает плотность потока энергии на поверхности мишени в диапазоне $10^{13} - 10^{14} \text{ Вт/см}^2$. Энергетическая контрастность излучения составляет $10^4 - 10^5$, расходимость $2\alpha = (5 - 8) \cdot 10^{-4} \text{ рад}$.

Формирование предимпульса осуществляется путем расщепления импульса после прохождения затвора Поккельса с помощью зеркал с различными коэффициентами пропускания. Энергия предимпульса варьируется в диапазоне $10^{-3} - 10^{-1}$ от энергии основного импульса, а задержку между ними в диапазоне 0.5 – 5 нс.

Получение экспериментальных данных по энергетическим параметрам излучения – энергии основного и предварительного импульсов, энергии прошедшего через фольгу и рассеянного в различных направлениях излучения – осуществляется с помощью калориметрического комплекса. Получение данных о пространственной структуре лазерного импульса производится с помощью камер на основе ПЗС-матрицы.

В четвертом параграфе изложены результаты нескольких серий экспериментов по облучению тонких алюминиевых фольг, проведенных на установке «ПИКО». Приведены графики, иллюстрирующие зависимость доли энергии прошедшего через фольгу лазерного излучения по отношению к энергии падающего излучения при различных энергиях импульсов и различных задержках между предимпульсом и основным греющим импульсом. Показано существования оптимальных параметров, при которых симметризация абляционного давления производится наиболее эффективно.

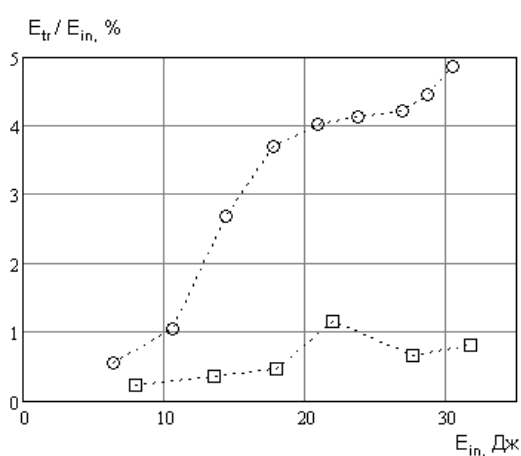


Рис.1 Экспериментальная зависимость отношения энергии прошедшего через фольгу излучения (E_{tr}) к энергии падающего на мишень излучения (E_{in}) от падающей энергии при энергии предимпульса, составляющей 10% от энергии греющего излучения, при задержке 1.5 нс. Для эксперимента без предимпульса (точки круглой формы) и предимпульсом (точки квадратной формы).

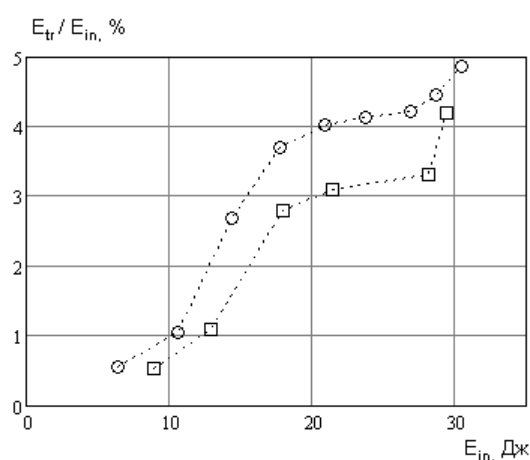


Рис.2 Экспериментальная зависимость отношения энергии прошедшего через фольгу излучения (E_{tr}) к энергии падающего на мишень излучения (E_{in}) от падающей энергии при энергии предимпульса, составляющей 0.5% от энергии греющего излучения, при задержке 1.5 нс. Значительное снижение эффекта симметризации.

В пятом параграфе представлены данные двумерного численного моделирования процесса абляции, проведенного с помощью программы «NUTCY», созданной в Институте математического моделирования РАН совместно с теоретическим отделом ОКРФ ФИАН. С помощью разностных методов решалась система уравнений газовой динамики для многокомпонентных сред, нелинейной теплопроводности и

распространения лазерного излучения в двумерной геометрии. Показано качественное совпадение результатов моделирования предложенного метода симметризации с экспериментом.

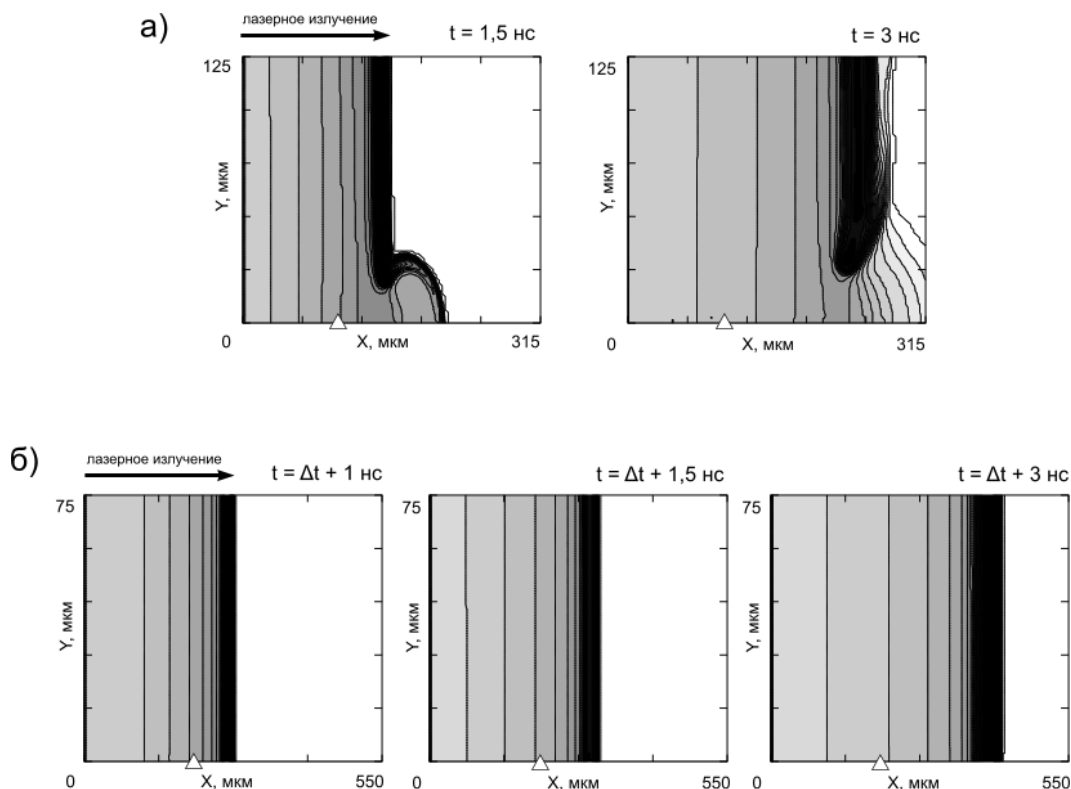


Рис.3 Поле плотностей плазмы в окрестности неиспаренной части мишени на моменты времени 1.5 нс (момент максимальной интенсивности излучения) и 3 нс (конец лазерного импульса) в отсутствии предимпульса (а). Поле плотностей плазмы в случае, когда до прихода «спекла» с максимальной интенсивностью $I_2 = 8.48 \cdot 10^{14}$ Вт/см² мишень облучалась предимпульсом с максимальной интенсивностью $I_1 = 2.358 \cdot 10^{13}$ Вт/см². Δt , временная задержка между основным импульсом и предимпульсом, составляла 1 нс (б). Белым треугольником обозначено изначальное положение поверхности мишени, где поглощается лазерное излучение.

В шестом параграфе изложены основные выводы относительно проведенных экспериментов и сравнений с расчетными данными.

Третья глава посвящена исследованию генерации высокоэнергичных электронов в лазерной плазме. Предложена оригинальная модель стохастического ускорения в электромагнитном поле со случайными скачками фазы.

В первом параграфе представлен обзор современных публикаций, посвященных механизмам генерации «быстрых» электронов в плазме.

Основным содержанием второго параграфа являются результаты математического моделирования процессов ускорения электронов. В модели решаются релятивистские уравнения движения заряженной частицы в электромагнитном поле, моделирующем распространение лазерного излучения в короне лазерной плазмы.

Временная форма лазерного импульса приближенно описана огибающей:

$$\delta(t) = [(1 - t/\tau) \cdot t/\tau].$$

Многокомпонентный спектр лазерного импульса аппроксимирован функцией:

$$f(j) = \left(1 - \frac{j}{N_L}\right) \cdot \frac{j}{N_L},$$

где j – номер компоненты, а N_L – количество компонент. Излучение Nd-лазера обычно состоит из 12-ти компонент, однако мы ограничились рассмотрением только 4-х компонент с целью упрощения и ускорения численных расчетов. Фазовый множитель каждой компоненты представлен выражением:

$$f_e(j, t) = \exp\left(i \cdot \left[\omega_0 \left[1 + \left(\frac{\Delta n_\lambda}{n_\lambda} \right) \cdot \left(j - \frac{N_L}{2} \right) \right] \cdot \left(t - \frac{\tau}{2} \right) - \Phi_j \right] \right) \cdot f(j),$$

где ω_0 – частота в максимуме спектральной линии, n_λ – число периодов в импульсе длительностью τ , Δn_λ – выраженный в количестве периодов частотный интервал между соседними эквидистантными компонентами, Φ_j – случайная фаза.

Для изучения ускорения частиц в электромагнитном поле, сформированном таким образом, как описано выше, рассматриваются релятивистские уравнения движения «положительного» электрона во внешнем поле:

$$\frac{d\vec{r}'}{dt} = v'(\vec{p}'); \frac{d\vec{p}'}{dt} = \frac{q}{c} \cdot \vec{v}'(\vec{p}') \times \vec{B}(\vec{r}', t') + q \cdot \vec{E},$$

где неизвестными являются пространственные координаты и вектор импульса частицы. Для упрощения численного интегрирования введена следующая замена переменных:

$$t = ct', \vec{p} = \frac{\vec{p}'c}{mc^2}, T_{kin} = T'_{kin} \cdot mc^2, \vec{V} = \frac{\vec{V}'}{c}, \vec{E} = \frac{q\vec{E}'}{mc^2}, \vec{B} = \frac{q\vec{B}'}{mc^2}.$$

Тогда уравнения движения можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\beta}(\vec{p}), \vec{\beta}(\vec{p}) = \frac{\vec{p}}{\sqrt{1 + (\vec{p} \cdot \vec{p})}} \\ \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{\beta}(\vec{p}) \times \vec{B}(\vec{r}, t) + \vec{E}(\vec{r}, t) \end{cases}$$

Время t и координаты x , y , z выражены в см, энергия T и компоненты импульса p_x , p_y , p_z – в единицах энергии покоя электрона mc^2 . Уравнения движения частицы решались с помощью метода Рунге-Кутты четвертого порядка с адаптивным размером шага. В численных расчетах анализировалось движение от 1000 до 2000 свободных электронов. Длительность лазерного импульса составляла 3.5 пс, что соответствует приблизительно 1000 длинам волн. Форма импульса была аппроксимирована параболической функцией $\delta(t)$ с коэффициентом контрастности, сильно отличающимся от гауссовой функции. Набор электроном энергии происходил только в плоскости X-Y, несмотря на трёхмерную траекторию его движения. Рассматривалось однородное нейтральное облако не взаимодействующих друг с другом электронов в электромагнитном поле, модулированном в пространстве и времени. Рассматриваемые электроны начинали свое движение из ограниченной области пространства, в которой были расположены случайным образом. Начальное распределение импульсов частиц соответствовало температуре ~ 0.5 кэВ, что отражает типичное состояние короны лазерной плазмы вблизи критической области при указанных выше уровнях интенсивности

излучения. Расчеты проводились с пространственным разрешением в 50 точек на длину волны, а временное разрешение было подобрано так, чтобы исключить влияние возмущений, связанных с численным счетом.

В данной модели рассмотрено появление высокоэнергичных электронов, которые создают пространственный заряд в плазме после вылета из нее. Общее число таких электронов можно определяется из потенциального заряда плазменного облака, благодаря его конечному размеру, и средней энергии вылетающих электронов. Другими словами, в данной работе произведен расчет функции распределения энергии электронов и плотности тока, который дает возможность оценить порядок макроскопического электрического поля (плазменный потенциал).

Построены расчетные траектории движения частиц в различные моменты времени относительно начала лазерного импульса, иллюстрирующие стохастический характер движения в начальный момент времени и формирование направленного движения в конце импульса.

Приведены графики зависимости формы функции распределения энергии электронов и зависимость средней энергии от интенсивности в фокусе.

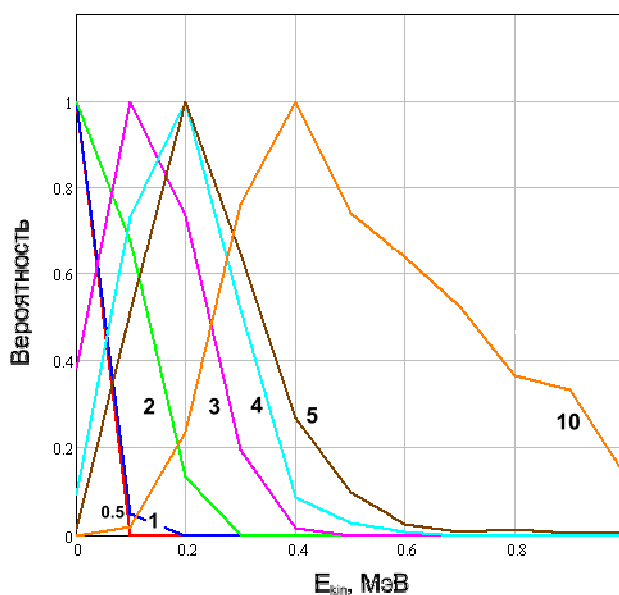


Рис. 4 Функции распределения, нормированные на максимальную вероятность для различных интенсивностей поля. Цифры около кривых обозначают напряжённость поля в 10^6 ед. СГСЭ/см

В третьем параграфе произведено сопоставление экспериментальных и расчетных данных. Полученные результаты численного моделирования энергетического спектра электронов позволяют сделать вывод о качественном соответствии с полученными ранее экспериментальными результатами.

В четвертом параграфе сформулированы основные результаты, полученные при моделировании процессов стохастического ускорения электронов в лазерной плазме. Определена зависимость средней энергии стохастических электронов от плотности потока $E_{kin} \sim q^{(0,45 \pm 0,9)}$ в диапазоне потоков $q = 6 \cdot 10^{13} \div 10^{17}$ Вт/см² соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана оригинальная программа, позволяющая производить численное моделирование структуры электромагнитного поля лазерного излучения, фокусируемого сферической линзой;
2. Проведена серия экспериментов по облучению тонких алюминиевых фольг, имитирующих оболочку термоядерной мишени, парами лазерных импульсов с различной энергией и временной задержкой между ними. Полученные данные свидетельствуют об эффективности использования схемы ЛТС с предимпульсом на той же длине волны, что и основной греющий импульс, для симметризации абляционного давления;
3. Экспериментально установлено существование оптимальных параметров предимпульса – энергии и задержки относительно основного импульса, – при которых симметризация происходит наиболее эффективно;
4. Показано качественное совпадение экспериментальных данных с теоретическими, что подтверждает возможность использования

описанного метода двумерного численного моделирования для оптимизации абляционного сжатия мишеней

5. Разработана модель стохастического ускорения электронов в лазерной плазме и создана 2D программа для его численного моделирования
6. Получены расчетные данные о динамике ускорения электронов в плазме, их траекториях и функциях распределения электронов по энергии в модели стохастического ускорения. Определена зависимость средней энергии высокоэнергичных электронов от плотности потока греющего излучения

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. М.А.Гречко, О.А.Житкова, М.А.Журович, А.О.Илясов и др., «Исследование симметризирующего воздействия лазерного предимпульса на неоднородность нагрева тонких фольг», Препринт ФИАН, Москва 2005
2. Ю.А.Михайлов, М.А.Гречко, О.А.Житкова, М.А.Журович и др. «Влияние предимпульса на сглаживание абляционного давления при лазерном нагреве тонких фольг», Препринт ФИАН, Москва 2007
3. Yu. A. Mikhailov, M. A. Grechko, O. A. Zhitkova, M. A. Zhurovich, A. V. Koutsenko, I. G. Lebo, J. Limpouch, A. A. Matsveiko, V. B. Rozanov, G. V. Sklizkov, A. N. Starodub, V. F. Tishkin, and A. M. Chekmarev «Effect of a prepulse on ablation-pressure smoothing in laser heating of thin foils», Journal of Russian Laser Research, 2007, v.28, 4, 310

4. Yu. A. Mikhailov, L. A. Nikitina, G. V. Sklizkov, A. N. Starodub, and M.A. Zhurovich. «Stochastic heating of Electrons in Focused Multimode Laser Fields», Journal of Russian Laser Research, 2007, v.28, 4, 344
5. Y. A. Mikhailov, L. A. Nikitina, G. V. Sklizkov, A. N. Starodub, and M. A. Zhurovich «Relativistic electron heating in focused multimode laser fields with stochastic phase perturbations», Laser and Particle Beams, 2008, v. 26, 525-536
6. М.А. Журович, О.А. Житкова, И.Г. Лебо, Ю.А. Михайлов, Г.В. Склизков, А.Н. Стародуб, В.Ф. Тишкин «Выравнивание абляционного давления в короне лазерной плазмы при нагреве мишеней для ЛТС», Квантовая электроника, 2009, 39, №6, 531-536

Журович Максим Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОСТИ АБЛЯЦИОННОГО ДАВЛЕНИЯ И
ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ С
ЦЕЛЮ ОПТИМИЗАЦИИ СЖАТИЯ ЛАЗЕРНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ
МИШЕНЕЙ

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать 18.09.2009. Формат 60 x 84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 70 экз. Заказ № ф-127

Государственное образовательное учреждение

высшего профессионального образования

«Московский физико-технический институт (государственный
университет)»

Отдел автоматизированных издательских систем

«ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ»

141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9