

Исследование симметризирующего воздействия лазерного предимпульса на неоднородность нагрева тонких фольг

А.О.Илясов, И.Г.Лебо, Ю.А.Михайлов, В.Б.Розанов,
Г.В.Склизков, А.Н.Стародуб, В.Ф.Тишкин

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований нагрева плазмы лазерным излучением с неоднородной пространственной структурой и исследования симметризирующего воздействия лазерного предимпульса на однородность нагрева тонких фольг, моделирующих тонкостенные ЛТС-мишени. Продемонстрирована высокая эффективность метода симметризации абляционного давления предимпульсом.

Ключевые слова: лазерный нагрев плазмы, неоднородное облучение, симметризация предимпульсом.

1. Введение

Для достижения больших коэффициентов усиления в лазерных термоядерных мишенях требуется сжать ДТ-горючее до плотности, превышающей в $10^4 - 10^5$ раз его первоначальную плотность. Для этого сферические мишени облучают большим количеством лазерных пучков, с тем, чтобы обеспечить на поверхности мишени однородный нагрев внешних слоев. Получить 100 %-ную однородность облучения мишени практически невозможно из-за неравномерного перекрытия пучков, интерференционных явлений в высококогерентных лазерных пучках, неоднородности усиления в лазерном тракте, дефектов в усилительных каналах лазера. Эти неоднородности облучения приводят к возмущению абляционного давления на границе испарения вещества. Из-за развития гидродинамических неустойчивостей в процессе сжатия первоначально малые возмущения плотности и давления нарастают, что может привести к нарушению симметрии ускоряемой оболочки термоядерной мишени, перемешиванию инерционных слоев оболочки с ДТ-горючим и к резкому снижению термоядерного энерговыделения (см., напр., [1, 2]).

В работе [3] предложено использовать симметризирующий лазерный предимпульс для уменьшения влияния неоднородности нагрева сферической мишени. В [4] на основании двумерных численных расчетов, выполненных по программе «АТЛАНТ», показано, что за счет симметризирующего предимпульса с энергией ~ 0.1 от энергии основного греющего импульса удается в 2–3 раза снизить скорость роста возмущения при сжатии наполненной ДД-газом стеклянной оболочки. В [5] предлагается использовать симметризирующий предимпульс на длине волны, большей, чем у основного греющего импульса. В Физическом институте Чешской академии наук

совместно с Физическим институтом им. П.Н.Лебедева и Институтом математического моделирования РАН был проведен цикл исследований симметризации неоднородности облучения с помощью предимпульса с длиной волны, в 2–3 раза большей длины волны основного импульса. Сравнение экспериментальных данных и двумерных численных расчетов показало, что при соответствующем выборе параметров основного греющего импульса и предимпульса можно существенно улучшить однородность нагрева мишени [6, 7].

В Лаборатории лазерной плазмы Физического института на установке «Пико» в течение ряда лет ведутся исследования по нагреву и ускорению тонких фольг с помощью мощных лазерных импульсов [8, 9]. В экспериментах была обнаружена резкая зависимость доли лазерной энергии, прошедшей через фольгу, от ее толщины, а также выявлено сокращение длительности прошедшего лазерного импульса. Из сравнения с результатами численных расчетов следовало, что в случае тонких фольг из Al (толщина менее 3 мкм) такое «просветление мишени» объясняется испарением вещества. В то же время некоторая доля лазерной энергии проникала и через достаточно толстые алюминиевые фольги, что не могло быть объяснено только испарением внешних слоев [8]. Похожий эффект аномально большого прохождения лазерного излучения через толстые фольги наблюдался в экспериментах на установке Gekko в Японии [10]. Такое аномально большое проникновение лазерного излучения через толстые слои может быть объяснено эффектом так называемого микропродавливания [11], когда из-за больших поперечных градиентов давления, связанных с наличием «спеклов» в поперечном сечении лазерных пучков, плотные слои раздвигаются и пропускают излучение. В [8] было предложено использовать лазерный предимпульс с длиной волны, совпадающей с длиной волны основного импульса, греющего плазму, для симметризации абляционного давления.

В настоящей работе приведены результаты предварительных двумерных расчетов, демонстрирующие возможность микропродавливания. На установке «Пико» экспериментально подтверждена высокая эффективность предложенного метода симметризации неоднородности

А.О.Илясов, И.Г.Лебо, Ю.А.Михайлов, В.Б.Розанов, Г.В.Склизков, А.Н.Стародуб. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: mikh@sci.lebedev.ru
В.Ф.Тишкин. Институт математического моделирования РАН, Россия, 125047 Москва, Миусская пл., 4а; e-mail: tishkin@imamod.ru

родности абляционного давления, возникающей из-за присутствия спеклов в области фокусировки лазерного излучения.

2. Численное моделирование симметризации с помощью лазерного предимпульса

Для моделирования неоднородного нагрева и эффекта микропродавливания конденсированных слоев мишени использовалась программа «НАТСИ» в эйлеровых цилиндрических координатах (r, z) [12]. Численно решалась система уравнений газовой динамики, нелинейной теплопроводности и переноса лазерного излучения вдоль оси лазерного пучка OZ . Для удобства расчетов использовалась неравномерная по обоим направлениям сетка с наименьшим шагом вдоль направления OZ в окрестности начального положения алюминиевой фольги ($z \approx 0$); затем шаг увеличивался в обоих направлениях в геометрической прогрессии. Минимальный шаг по радиусу имел место в окрестности оси и возрастал вдоль направления R . Параметры задач выбирались близкими к реализованным в экспериментах.

Постановка задачи была следующей. Алюминиевая мишень толщиной $d = 3$ мкм облучалась двумя лазерными импульсами. Оба импульса имели треугольную временную форму с моментами времени $t_i = t_0$, $t_i = t_0 + 1.5$ нс, $t_i = t_0 + 3$ нс, где t_0 – параметр, который в первом импульсе ($i = 1$) равнялся нулю, а во втором ($i = 2$) – времени задержки между импульсами Δt . Максимальные интенсивности импульсов обозначены Q_1 и Q_2 . Первый импульс имел постоянное распределение интенсивности по радиусу ($0 \leq r \leq R$), а второй – гауссово распределение ($\propto \exp[-(r/r_{\text{eff}})^2]$, где r_{eff} – эффективный радиус пучка). Первый импульс моделировал предимпульс лазерного излучения, а второй импульс – лазерный спекл. В расчетах значения Q_1 , Q_2 , r_{eff} и Δt варьировались, а параметры мишени были фиксированы.

В первой серии расчетов изучалось симметризирующее воздействие предимпульса при $\Delta t = 0, 0.5$ и 1.5 нс и фиксированном отношении интенсивностей лазерных импульсов. Первый случай соответствовал отсутствию предимпульса ($\Delta t = 0$) при $Q_1 = 2.358 \times 10^{13}$ Вт/см², $Q_2 = 8.48 \times 10^{14}$ Вт/см² (отношение интенсивностей $n = 36$), $r_{\text{eff}} = 5$ мкм и размерах области счета $0 \leq z \leq 1200$

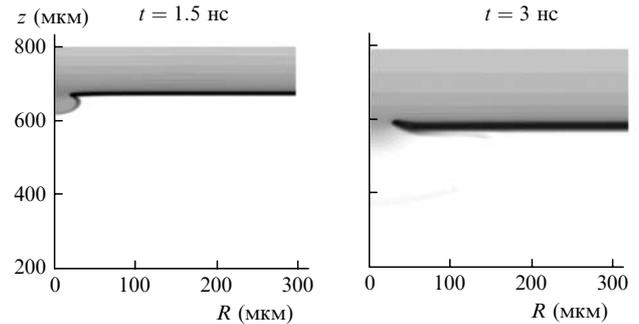


Рис.1. Формирования отверстия в мишени в моменты времени 1.5 и 3 нс при отношении интенсивностей $Q_1/Q_2 = n = 36$ и задержке греющего импульса относительно предимпульса $\Delta t = 0$; $Q_1 = 2.358 \times 10^{13}$ Вт/см², $Q_2 = 8.48 \times 10^{14}$ Вт/см², $r = 5$ мкм, $R = 300$ мкм.

мкм, $0 \leq r \leq R = 300$ мкм. Приблизительно к моменту времени $t = 1.5$ нс в мишенях в окрестности оси пучка формировалась область плазмы с плотностью порядка и менее критической, которая сохранялась до конца импульса (рис.1). При задержках $\Delta t = 0.5, 1.5$ нс и отношении интенсивностей $n = 36$ наблюдалась полная симметризация мишени.

Во второй серии расчетов изучалась зависимость эффекта симметризации от отношения интенсивностей. Были сделаны расчеты для $n = 90, 200$ и 360 при фиксированном значении $Q_2 = 8.48 \times 10^{14}$ Вт/см² и $\Delta t = 1.5$ и 0.5 нс. Вплоть до $n = 200$ и при временной задержке $\Delta t = 0.5$ нс происходила полная симметризация абляционного давления. С увеличением времени задержки до 1.5 нс полная симметризация наступала при $n \leq 250$.

При проведении расчетов наблюдался любопытный эффект затекания, когда отверстие, образованное при продавливании мишени, заполнялось плазмой с периферийных слоев. Так, на рис.2 показаны результаты расчетов в случае $n = 90$ и $\Delta t = 0$. Видно, что к моменту времени $t = 1.5$ нс в плотной плазме формируется отверстие у оси, а к моменту $t = 3$ нс, наоборот, у оси возникает уплотнение за счет столкновения в центре ступок плазмы, натекающих с периферийных слоев. Поскольку в натурном эксперименте спеклы могут менять свое положение в процессе нагрева мишени, то можно ожидать, что при фотографировании свечения мишеней с тыльной стороны с соответствующим временным разрешением эф-

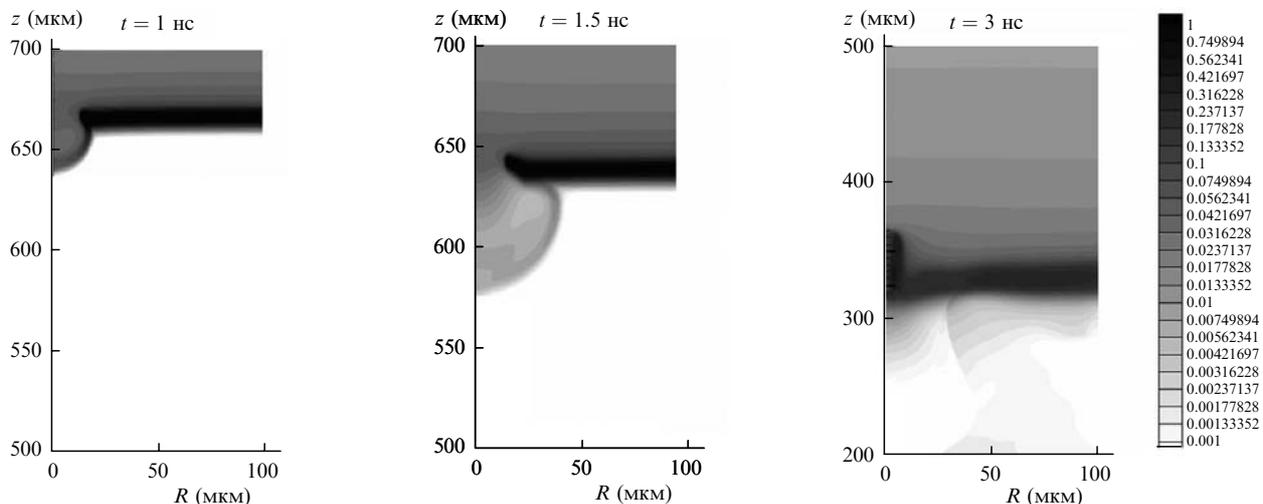


Рис.2. Формирование отверстия в мишени при отношении интенсивностей $n = 90$ и задержке $\Delta t = 0$. Показано формирование отверстия к моменту 1.5 нс и затем затекание плазмы; $Q_1 = 9.5 \times 10^{12}$ Вт/см², $Q_2 = 8.48 \times 10^{14}$ Вт/см², $r = 5$ мкм, $R = 100$ мкм.

фект затекания приведет к появлению мерцающих картинок.

Таким образом, на основании численных расчетов показано, что симметризирующий предимпульс с интенсивностью $\sim 1\%$ от интенсивности греющего импульса способен подавить мелкомасштабную неоднородность нагрева мишени, обусловленную наличием спекловой структуры в распределении излучения основного греющего импульса.

3. Экспериментальные результаты

В качестве лазерных мишеней использовались алюминиевые фольги толщиной 3–10 мкм. Мишени облучались импульсами лазера на Nd-стекле ($\lambda = 1.06$ мкм) с длительностью на полувысоте 2 нс. Энергия на выходе лазера варьировалась в диапазоне 10–30 Дж, что позволяло получать плотность потока на поверхности мишени от 10^{13} до 10^{14} Вт/см². Расходимость излучения $2\alpha = (5-8) \times 10^{-4}$ рад, энергетическая контрастность $K_E = 10^4 - 10^5$, ширина гауссова спектра излучения на полувысоте $\delta\lambda = 30$ Å. Характерная экспериментальная спекловая структура лазерного излучения на поверхности мишени, зарегистрированная камерой на основе ПЗС-матрицы [13, 14], приведена на рис.3.

Временная форма предимпульса практически повторяла форму основного греющего импульса. Основной импульс мог управляемо задерживаться по отношению к предимпульсу на 0.5–5.0 нс. Энергия в предимпульсе могла составлять $10^{-3} - 10^{-1}$ от энергии основного импульса. Однородность пространственной структуры предимпульса обеспечивалась с помощью специальной фазовой пластинки.

В настоящей работе для моделирования процессов в термоядерных мишенях на установке «Пико» была раз-

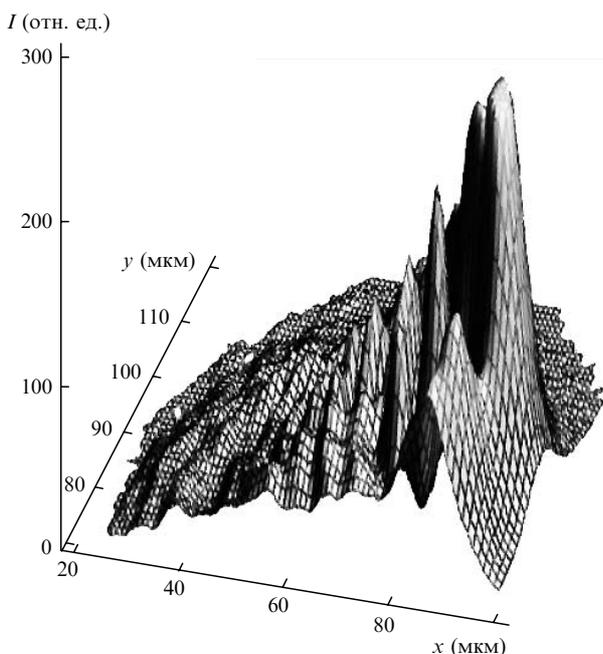


Рис.3. Характерная поперечная структура интенсивности при неоднородном облучении мишени. Размер минимальных всплесков интенсивности на поверхности мишени составляет 5–10 мкм, что близко к дифракционному размеру. Пиковая интенсивность превышает среднюю по пучку до 10 раз.

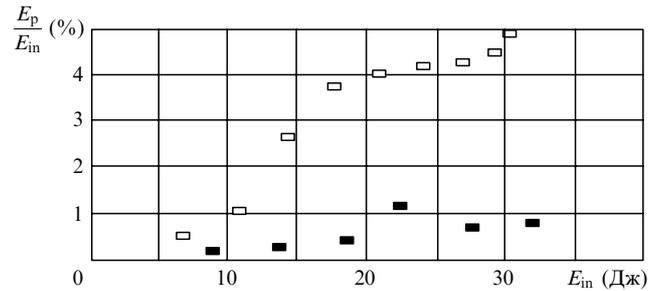


Рис.4. Экспериментальная зависимость отношения энергии прошедшего через фольгу излучения E_p к энергии падающего на мишень излучения E_{in} от падающей энергии в отсутствие (светлые прямоугольники) и при наличии предимпульса (темные прямоугольники). Размеры точек отражают точность calorиметрических измерений.

работана методика исследования лазерной плазмы в экспериментах по нагреву мишеней из фольг. Эта методика включала в себя систему сбора и автоматической обработки экспериментальных данных об энергетической и временной структурах лазерного излучения в зоне взаимодействия с помощью calorиметрического комплекса и коаксиальных фотоэлементов, а также автоматизированную систему контроля структуры фокусируемого на мишень лазерного излучения, аналогичные описанным в работе по неоднородному облучению фольг на установке «Пико» [8].

Экспериментально наблюдаемый эффект сглаживающего влияния предимпульса наглядно иллюстрируется на рис.4. Результаты прожигания фольги в отсутствие предимпульса и при его включении имеют вид зависимости доли прошедшего через прожигаемые отверстия энергии лазерного излучения по отношению к энергии падающего на мишень излучения от энергии греющего излучения, падающего на мишень.

Энергия падающего на мишень излучения E_{in} варьировалась в пределах 10–30 Дж, энергия предимпульса составляла $0.1E_{in} \approx 1-3$ Дж, предимпульс опережал основной импульс на 1.5 нс. Доля отраженного в апертуру линзы излучения была менее 2%. В качестве мишени использовались алюминиевые фольги толщиной 3 мкм.

4. Заключение

Следует отметить наблюдаемое в экспериментах существенное влияние предимпульса на характер прожигания мишени излучением, имеющим спекловую структуру (доля прошедшей энергии уменьшается примерно на порядок), и хорошее совпадение экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. Что касается термоядерных приложений, то полученные результаты показывают возможность эффективной симметризации абляции предимпульсом наряду с другими возможными методами, такими как снижение степени когерентности лазерного излучения, улучшение структуры большого количества лазерных пучков на многоканальных установках и, наконец, применение специальных термоядерных мишеней (с малоплотными абляторами, рентгеновскими конверторами и т. д.)

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Интеграция» (проект УНЦ «Фундаментальная оптика и спектроскопия» № B0049) и INTAS (грант № 572, конкурс 2001 г.).

1. Басов Н.Г., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И. *Лазерные термоядерные установки*, (М.: ВИНТИ, т. 25, 1984).
2. Басов Н.Г., Лебо И.Г., Розанов В.Б. *Физика лазерного термоядерного синтеза* (М.: Знание, 1988).
3. Боков Н.Н., Бунатян А.А., Лыков В.А. и др. *ЖПМТФ*, **134** (4), 20 (1982).
4. Gamaly E.G., Favorsky A.P., Fedyanin A.O., Lebo I.G., et al. *Laser and Particle Beams*, **8**, 399 (1994).
5. Mashek K., Kralikova V., L. Laska, K. Rohlena, Garanin S. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2767**, 91 (1994).
6. Iskakov A.V., Tishkin V.F., Lebo I.G., et al. *Phys Rev. E*, **61**, 842 (2000).
7. Iskakov A.V., Tishkin V.F., Lebo I.G., et al. *Laser and Particle Beams*, **20**, 135 (2002).
8. Иванов В.В., Куценко А.В. Лебо И.Г. и др. *ЖЭТФ*, **116**, 1287 (1999).
9. Koutsenko A.V., Lebo I.G., Matzveiko A.A., et al. *Laser and Particle Beams*, **17**, 557 (1999).
10. Mizui J., Yamaguchi N., Yamanaka T., Yamanaka C. *Phys. Rev. Lett.*, **39**, 619 (1977).
11. Zvorykin V.D., Lebo I.G. *Laser and Particle Beams*, **17**, 69 (1999).
12. Лебо И.Г., Никишин В.В., Розанов В.Б. и др. *Физика плазмы*, **26**, 434 (2000).
13. Журович К.А., Кириллов В.П., Михайлов Ю.А. и др. *ПТЭ*, № 5, 79 (2000).
14. Журович К.А., Кириллов В.П., Михайлов Ю.А. и др. *ПТЭ*, № 4, 113 (2001).