

## Иерархия процессов в мишенях лазерного термоядерного синтеза и инерциальные стабилизирующие воздействия

В.В. Афанасьев, Е.А. Богослов, М.П. Данилаев, Ю.Е. Польский

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ  
420111, Российская Федерация, г. Казань  
ул. К. Маркса, 10

Предложен подход к стабилизации плазмы в мишенях для лазерного термоядерного синтеза инерциальными воздействиями. Показано, что предлагаемый подход позволяет с общих позиций анализировать механизмы замедления развития локальных неустойчивостей в плазме мишеней и обеспечения требуемых временных законов изменения плотности потока энергии для устойчивого сжатия и нагрева мишени, а также решать обратную задачу устойчивости плазмы с выявлением требуемого закона распределения плотности материала и присадок в абляционном и рабочем слоях мишени.

*Ключевые слова:* лазерный термоядерный синтез, инерциальные стабилизирующие воздействия, замедление развития локальных неустойчивостей.

Перспективное направление развития энергетики связано с практической реализацией термоядерного синтеза. Один из бурно развивающихся подходов к получению термоядерной энергии основан на лазерном термоядерном синтезе (ЛТС) [1]. Основным ограничивающим фактором при реализации ЛТС являются неустойчивости плазмы в мишенях, содержащих термоядерное горючее [2–4]. Причем для каждого типа мишени, ее конструкции и способа подвода внешней энергии (длина волны лазерного излучения, длительность и форма импульса, количество пучков и т. д.) всегда найдется свой вид неустойчивостей [5].

В общем случае, возможно выделить как минимум два подхода к снижению амплитуды и скорости нарастания неустойчивостей плазмы в мишенях ЛТС. Первый подход основан на стремлении создать «идеальные» условия реализации ЛТС: равномерное распределение излучения драйвера на поверхности мишени, малые (не более 1 %) отклонения в геометрии мишени, заданное распределение примесей в оболочке мишени и пр. В рамках этого подхода при формализации требований к мишеням ЛТС согласно литературным данным [1; 3], как правило, не учитываются следующие факторы: процент выхода пригодных мишеней (воспроизводимость); технологичность изготовления мишеней; возмож-

ность контроля параметров мишеней на основных этапах изготовления; серийнопригодность при изготовлении мишеней. Учет этих факторов приводит к принципиальным ограничениям на развитии существующих конструкций мишеней и технологий их изготовления. Так, в рамках существующих подходов к созданию типовых конструкций мишеней, например, полимерных оболочечных мишеней, создать «идеальную» воспроизводимую, технологичную и серийнопригодную мишень крайне затруднительно [3]. Совокупность даже малых отклонений в конструкции мишени, распределении излучения драйвера на поверхности мишени, позиционирования мишени в пространстве приводят к недопустимым скоростям и амплитудам роста плазменных неустойчивостей.

Второй подход предполагает, что отклонения от идеальности в условиях реального ЛТС принципиально неизбежны, как следствие – неизбежно возникновение значимых неустойчивостей плазмы в мишенях [4; 5]. Поэтому необходимо предусматривать такие меры по стабилизации процесса нагрева и сжатия мишени, при которых всегда возникающие и развивающиеся неустойчивости в плазме не превысят пространственные размеры ограниченных областей на заданных временных интервалах, определяемых длительностью процессов ЛТС. Методы стабили-

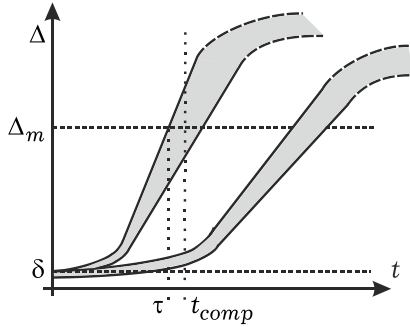


Рис. 1

зации плазмы, основанные на применении следящей ООС, практически не реализуемы, из-за высокой скорости развития процесса ИТС. В то же время известно, что одним из эффективных методов препятствующих развитию неустойчивостей в плазме являются инерциальные воздействия (ИВ), с периодом, меньше характерного времени изменения энергоемкого параметра плазмы в переходном режиме, и не требующие применения следящей обратной связи [7; 8]. При этом ИВ действует одновременно на все типы неустойчивостей, удовлетворяющих приведенному выше условию.

Целью работы является анализ возможности применения метода инерциальных воздействия (ИВ), препятствующих развитию неустойчивостей плазмы на ограниченных временных интервалах, в ограниченных областях их развития.

При реализации ЛТС принципиально важно не само отсутствие неустойчивостей в плазме мишени, а характерные времена их развития ( $\tau$ ) и размеры области неустойчивости. Характерные размеры областей неустойчивости ( $\Delta_m$ ) в плазме не должны превысить допустимую величину ( $\Delta$ ) за время сжатия мишени:

$$\Delta_m < \Delta; \quad \tau < t_{comp}. \quad (1)$$

При этом ИВ действует одновременно на все типы неустойчивостей с характерными скоростями развития, меньшими скорости внешнего воздействия.

Данный подход поясняет диаграмма развития неустойчивостей (рис. 1).

Для сложных динамических систем ИВ позволяют увеличить длительность развития различных типов неустойчивостей (рис. 1 – кривые 2).

Стабилизацию плазмы в МГД приближении возможно выполнить за счет ИВ [7; 8] путем модуляции напряженности магнитного поля  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ , плотности тока  $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$ , давления плазмы  $p(\mathbf{r}, t)$  и излучения драйвера  $\mathbf{I}(\mathbf{r}, t)$ . Модуляция параметров плазмы мишени ( $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ ,  $\mathbf{j}(\mathbf{r}, t)$  и

$p(\mathbf{r}, t)$ ) приводит к появлению результирующего стабилизирующего члена  $M_{\Sigma}\{\xi\}$  в уравнении для малых смещений  $\xi$  элемента объема плазмы от состояния равновесия:

$$M_{\Sigma}\{\xi\} = \frac{1}{2\omega^2\rho} \sum_{i=1}^3 k_i \Phi_i \frac{d\Phi_i}{d\xi}, \quad (2)$$

где, при допущении малости относительных изменений  $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$  в пределах ограниченных размеров областей  $\Delta_m$ , компоненты:  $\Phi_1 = [\mathbf{j} \times \boldsymbol{\Phi}] / C - [\mathbf{H} \times \text{rot } \boldsymbol{\Phi}] / 4\pi$ ,  $\Phi_2 = [\Delta_j \times \text{rot } \{\xi \times \mathbf{H}\}]$ ,  $\Phi_3 = \nabla \{\text{div } \xi\}$ ,  $k_1 = a$ ,  $k_2 = b/C^2$ ,  $k_3 = d\gamma^2$ .

Указанные временные ИВ, стабилизирующие плазменные неустойчивости мишени радиуса  $R_0$ , как следует из неравенств  $\Delta_m < \Delta$ ;  $\tau < t_{comp}$ , должны иметь скорости изменения не ниже  $R_0 / t_{comp}$ , что сложно реализуемо при ЛТС. В то же время, стабилизирующие ИВ возможно реализовать путем пространственных изменений параметров плазмы (например за счет структурирования мишени) по дискретным областями  $\Delta_m$ ,  $m = 1, 2, \dots$ . При этом интегральное векторное уравнение для определения максимально допустимых смещений  $\xi_m$  плазмы от состояния равновесия, еще стабилизируемых рассматриваемым типом ИВ, за ограниченное время  $t_{rm} \leq t_{comp}$  развития неустойчивости в пределах локальной области  $\Delta_m$ , приобретает вид:

$$\int_0^{t_{rm}} \left( \int_{-\xi_m}^{\xi_m} M\{\xi\} d\xi \right) dt = \int_0^{t_{rm}} \int_{-\xi_m}^{\xi_m} \sum_0^Q F_k\{\xi\} d\xi dt,$$

где  $Q$  – число компонент, описывающих изменение составляющих энергии плазмы (тепловой, магнитной, и др.) в пределах ограниченных областей  $\Delta_m$ , в которых возникают локальные неустойчивости. В этом случае, обеспечение структуры плазмы с дискретно-переменной величиной  $\Delta_m$ , может привести к возникновению пространственных видов ИВ стабилизирующего типа. Это позволяет искать характерный размер и распределение структурных неоднородностей в мишени на основе общих подходов к стабилизации сложных динамических систем инерциальными воздействиями [8].

Иерархия процессов в плазме мишеней ЛТС, необходимая для качественной оценки параметров временных и пространственных ИВ, была проведена на основании анализа большого числа открытых литературных данных, например [1–5; 9], и сведена в таблицу 1.

Таблица 1

Характерное время процесса, нормированное на длительность лазерного импульса	Процессы	Характерный размер, нормированный на радиус мишени	Пространственная характеристика
1	Лазерный импульс	1	Радиус мишени
0,1	Выгорание мишени	$\sim 1$	Пробег нейтронов и $\alpha$ -частиц
0,1–0,01	Сжатие мишени, Развитие неустойчивостей, насыщение поля вследствие диффузии	$10^{-2}$	Начальная амплитуда возмущений; ширина зоны неустойчивости Релея-Тейлора; масштабный градиент плотности
0,01	Свечение центральной области мишени; разлет мишени	$\frac{2\pi}{n}; n = 1 \div 20$	Длина волны квазиериодических колебаний в короне мишени. При $n \sim 10$ инкремент развития неустойчивостей входит в насыщение.

Из таблицы 1 следует, что период инерциального воздействия, стабилизирующего плазму не должен превышать порядок  $10^{-2}$  от длительности ( $t_d$ ) лазерного импульса. При типовых значениях  $t_d \sim 1$  нс характерная частота ИВ должна быть больше  $10^{11}$  Гц. Один из известных [10] подходов к реализации такого стабилизирующего воздействия основан на внутрочастотной модуляции лазерного импульса. Такую модуляцию можно осуществить, например, при использовании в качестве драйвера эксимерного лазера. Это, по предварительным оценкам, позволит повысить эффективность сжатия мишени на порядок. Стабилизация плазмы за счет временных ИВ приводит к необходимости использовать либо дополнительные внешние стабилизирующие воздействия, что существенно усложняет схему ИТС, либо накладывает ограничения на выбор драйвера и параметры его выходного излучения.

Стабилизацию плазмы за счет пространственных ИВ возможно обеспечить, например, за счет формирования определенной структуры мишени. Это позволяет, накладывая дополнительные требования к драйверу и к системе подвода излучения драйвера к мишени, обеспечить выполнение условий (1). Подобные методы обеспечения устойчивости плазмы исследовались теоретически и экспериментально [2, рис. 8; 5, рис. 3, б]. Так, при формировании ячеистой структуры оболочки полимерной мишени с размером ячейки меньшим характерного размера

области зарождения неустойчивости  $\Delta_m \sim 10^{-2} R_0$  [4; 9], возможно сгладить возмущения соответствующих масштабов, что подтверждается результатами математического моделирования [5]. Наличие в мишени слоя объемно-структурированного вещества снижает влияние крупномасштабных неоднородностей облучения [2].

Одну из возможных реализаций пространственных ИВ в плазме мишени для ИТС, можно, по мнению авторов, обеспечить путем изготовления структурированных многослойных мишеней со слоями, выполненными в виде ячеистых пространственных структур с переменным размером ячеек по глубине слоев мишени. Предлагаемая структурированность может привести к дроблению возникающих неустойчивостей в плазме мишени на отдельные локальные фрагменты, с характерными начальными пространственными областями  $\Delta_m$ . При этом, появление стабилизирующих членов вида (2) позволяет замедлить скорость развития локальных неустойчивостей в плазме, и как результат – уменьшить размеры области пространства, занимаемого развивающейся за  $\tau$  локальной неустойчивостью в плазме. Важным преимуществом предлагаемых структурированных многослойных мишеней является возможность взаимодавления локальных неустойчивостей в плазме, возникающих в различных локальных областях  $\Delta_m$  слоев мишени, при надлежащем выборе структуры слоев и параметров ячеистых пространственных структур.

Таким образом, использование предлагаемых пространственных инерциальных воздействий открывает новые возможности решения задачи повышения устойчивости плазмы путем снижения скорости развития неустойчивостей плазмы на заданных временных интервалах, либо уменьшения характерной области развития неустойчивостей до приемлемых величин.

Предлагаемый подход по методу стабилизирующих пространственных ИВ позволяет с общих позиций анализировать механизмы: замедления развития локальных неустойчивостей в плазме мишеней и обеспечения требуемых временных законов изменения плотности потока энергии для устойчивого сжатия и нагрева мишени, а также решать обратную задачу устойчивости плазмы с выявлением требуемого закона распределения плотности материала и присадок в абляционном и рабочем слоях мишени.

*Работа выполнена при поддержке задания № 11.34.214/К на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности.*

### Список литературы

1. Ядерный синтез с инерционным удержанием. Современное состояние и перспективы для энергетики / под ред. Б.Ю. Шаркова. М.: Физматлит, 2005. 264 с.
2. Гаранин С.Г., Деркач В.Н., Шнягин Р.А. Формирование однородного облучения мишени на мощных лазерных установках // Квантовая электроника. Т. 34. 2004. № 5. С. 427–446.
3. Меркульев Ю.А. Миниатюрные критические массы термоядерного горючего и делящихся элементов // Препринт. ФИАН. 2010. 136 с.
4. Гидродинамическая устойчивость сжатия сферических лазерных мишеней / Е.Г. Гамалий [и др.] // В сб. статей Теория нагрева и сжатия низкоэнтропийных термоядерных мишеней. Ответ. ред. Н.Г. Басов. М.: Наука, 1982. С. 73–83.
5. Розанов В.Б. О возможности сферического сжатия мишеней с термоядерным горючим при использовании для облучения двух лазерных пучков // УФН. Т. 174. 2004. № 4. С. 371–382.
6. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур. Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, НИЦ, 2004. 256 с.
7. Афанасьев В.В., Польский Ю.Е. Стабилизация магнитогидродинамических неустойчивостей в плазме при помощи инерциальных воздействий // Журнал технической физики. 1992. Т. 62. Вып. 12. С. 29–33.
8. Афанасьев В.В., Данилаев М.П., Польский Ю.Е. Стабилизация фрактального осциллятора инерциальными воздействиями // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 34. Вып. 7. С. 1–6.
9. Моделирование эмиссии нейтронов при облучении мишеней из дейтерированного полиэтилена сверхинтенсивными лазерными импульсами / С.А. Андреев [и др.] // Квантовая электроника. Т. 41. 2011. № 4. С. 377–381.
10. Теория нагрева и сжатия низкоэнтропийных термоядерных мишеней: сб. статей / ответ. ред. Н.Г. Басов. М.: Наука, 1982. 184 с.

## Hierarchy of the laser fusion targets processes and inertial stabilizing influence

*V.V. Afanasev, E.A. Bogoslov, M.P. Danilaev, Y.E. Polskiy*

An approach of inertial influences plasma stabilization in the lasers fusion targets is considered in that paper. It is showing that the suggested approach allows to do analyze processes in targets by common positions. For example, the slowdown of local instabilities in the plasma targets, provide the required time laws of energy flux density change for sustained compression and heating of the target, to solve the inverse problem of plasma stability with detection of the desired material density distribution and additives in ablative and working layers of the target.

*Keywords:* laser fusion, inertial stabilizing effect, slowing down the development of local instabilities.