
ПЛЕНАРНЫЙ ДОКЛАД

**ЛАЗЕРЫ – ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ
УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА****С.А. Бельков, С.Г. Гаранин***Нижегородский госуниверситет*

Проблема управляемого термоядерного синтеза (УТС) стоит перед мировой наукой уже более полувека. Высказанная в 1950 году А.Д. Сахаровым и И.Е. Таммом идея магнитной термоизоляции плазмы открыла такое важное направление в решении этой проблемы, как магнитное удержание. В настоящее время это направление продолжает развиваться в тесном сотрудничестве ученых международной коалиции России, США, стран Евроатома и Японии при создании Международного термоядерного экспериментального реактора – токамака ИТЭР [1].

Вместе с тем не ослабевает интерес и к другому способу решения проблемы УТС, который, в отличие от идеи магнитного удержания, уже продемонстрировал свою практическую применимость при разработке термоядерного оружия, основанного на этом принципе – инерциальный термоядерный синтез (ИТС). Идея ИТС заключается в отказе от попытки удерживать горячую плазму при осуществлении термоядерного горения топлива. Надо сжать и нагреть дейтерий-тритиевую (DT) плазму так, чтобы скорость термоядерного горения была выше, чем скорость разлета плазменного сгустка. Такой подход с успехом реализован в термоядерной бомбе. Для реализации концепции инерционного синтеза в лабораторных условиях необходимо инициировать термоядерную реакцию в маленькой массе, такой, чтобы термоядерное энерговыделение не приводило к разрушению лабораторной установки. В свою очередь уменьшение массы требует, чтобы время подвода энергии для инициирования горения также было достаточно мало, по крайней мере, не больше, чем время сжатия мишени с DT смесью.

Уникальные свойства лазерного излучения, позволяющие концентрировать энергию в малых объемах за короткое время, делают лазер незаменимым инструментом в области физики высоких плотностей энергии для исследований поведения вещества в экстремальных состояниях и открывают большие перспективы по реализации управляемого термоядерного синтеза на основе ИТС.

Первой опубликованной работой по использованию лазера для зажигания термоядерной реакции явилась статья Н.Г. Басова и О.Н. Крохина [2]. Несколько позже была опубликована статья американских ученых J. Nuckols и др. [3]. Эти работы дали старт новому направлению УТС – лазерному термоядерному синтезу (ЛТС).

Суть подхода к проблеме ЛТС заключается в следующем. Термоядерная мишень, представляющая собой сферическую оболочку, заполненную DT-топливом, однородно со всех сторон облучается лазерным излучением. Для того чтобы реализовать такое облучение, как правило, используются многопучковые лазерные системы. Часть вещества оболочки под действием мощного лазерного излучения испаряется, превращаясь в высокотемпературную плазму, и создаёт абляционное давле-

ние, под действием которого оболочка ускоряется и сжимает заключенное в ней DT-топливо. В момент максимального сжатия кинетическая энергия оболочки передается во внутреннюю энергию DT смеси, температура топлива быстро возрастает до величин, необходимых для протекания самоподдерживающейся термоядерной реакции. Данная схема в ЛТС получила название прямого сжатия. Также исследуется схема непрямого сжатия, когда мишень с термоядерным топливом облучается рентгеновским излучением, возникающим в результате нагрева лазерным излучением внутренней поверхности специального бокса, в центре которого располагается термоядерная мишень.

В настоящее время лазер является чрезвычайно полезным инструментом для исследования поведения вещества в экстремальных состояниях. Сегодня на лабораторных установках достигнуты интенсивности облучения мишеней $I \sim 10^{21}$ Вт/см², плотность сжатого вещества, примерно в 100 раз превышающая твердотельную и температура лазерной плазмы в сотни миллионов градусов.

Основными физическими явлениями (см. рис. 1), определяющими процесс лазерного нагрева и сжатия облучаемой мишени, являются:

- поглощение лазерного излучения,
- испарение и ионизация твердого вещества,
- электронный и радиационный теплоперенос,
- газодинамическое движение плазмы и формирование ударных волн,
- развитие неустойчивостей Рэлея-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова,
- турбулентное перемешивание.

Чтобы получить энергию в термоядерном синтезе, необходимо удовлетворить двум требованиям: нагреть плазму топлива до температуры, когда скорость термоядерных реакций максимальна, и удержать ее достаточно долго для того, чтобы энергия, выделенная в процессе синтеза, была больше энергии, затраченной на нагрев и удержание. Такое двойное требование в количественном виде обычно описывается математическим выражением, известным под названием критерия Лоусона, который отражает баланс между выделенной термоядерной энергией и энергией, затраченной на нагрев топлива. Этот критерий может быть выражен в виде условия, накладываемого на конечную плотность топлива n и время удержания τ . Если n выражается в числе ядер в кубическом сантиметре, а время удержания в секундах, тогда, как требует критерий Лоусона, произведение $n\tau$ должно превышать 10^{14} с/см³ в случае DT-реакций синтеза (и 10^{16} с/см³ для DD-реакций).

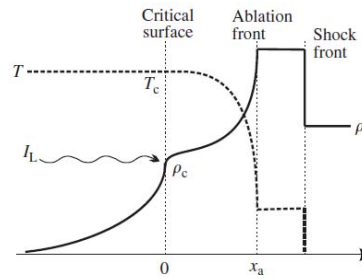


Рис. 1

Для систем, основанных на принципе инерциального удержания плазмы, к которым относится и ЛТС, время удержания определяется временем разлета сжатого термоядерного топлива и критерий Лоусона преобразуется в критерий ρR , а именно, для получения положительного энерговыделения необходимо, чтобы $\rho R \geq 0,3 \text{ г/см}^2$, где R – радиус сжатой DT плазмы. Важным вопросом, на который до сих пор нет убедительного ответа, является вопрос о минимальном уровне энергии лазерного излучения E_L , требуемом для зажигания термоядерной мишени. Простейшие оценки на основе критерия ρR , дают величину $E_L \geq 500 \text{ кДж}$.

Эта оценка подтверждается одномерными газодинамическими расчётами [4].

Облучаемая мишень представляла собой пластиковую сферическую оболочку диаметром около 1,5 мм и с толщиной стенки 30 мкм. На внутреннюю поверхность оболочки наморожен слой DT-льда толщиной около 25 мкм (так называемая криогенная мишень). Для обеспечения энергетически выгодного изотропического сжатия форма лазерного импульса была профилирована специальным образом, а его длительность согласована с

радиусом и массой оболочки таким образом, чтобы момент максимального сжатия термоядерного топлива совпадал с моментом окончания лазерного воздействия. Как следует из результатов расчётов (рис. 2), при этих параметрах мишени и лазерного импульса энергия, выделявшаяся в результате термоядерных реакций, почти в 10 раз превышает лазерную энергию. Выход термоядерных нейтронов составляет 2×10^{18} за импульс, объёмное сжатие δ термоядерного горючего – около 10^4 , а плотность DT-смеси на момент максимального сжатия – 100 г/см^3 .

История создания лазерных установок, на которых проводились экспериментальные исследования в области ЛТС, насчитывает более 40 лет. В настоящее время к числу наиболее крупных установок для исследования проблем ЛТС относятся:

- 192-пучковая лазерная система NIF с полной энергией $\approx 1,8 \text{ МДж}$ на длине волны $0,351 \text{ мкм}$ в импульсе профилированной формы длительностью $\approx 3\text{--}5 \text{ нс}$ [5];
- неодимовый лазер ГЕККО XII с энергией лазерного импульса 30 кДж в 12 пучках при его длительности 1 нс (Осакский институт лазерных исследований, Япония).
- двенадцати каналный йодный лазер «Искра-5» [6] с энергией лазерного импульса до 30 кДж при длительности $0,3 \text{ нс}$ (РФЯЦ-ВНИИЭФ).

В КНР и Франции создаются мощные твёрдотельные лазерные системы мегаджоульного уровня энергии: SG-III [7] и LMJ [8] соответственно.

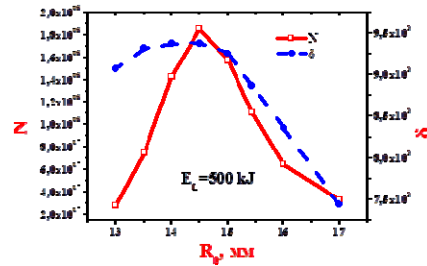


Рис. 2

В 2012 г. в России, во РФЯЦ-ВНИИЭФ начато создание 192-канальной лазерной установки на неодимовом фосфатном стекле с полной энергией излучения $\approx 2,8$ МДж в импульсе профилированной формы длительностью $\approx 3\text{--}5$ нс на длине волны 527 нм [9]. Как прототип модуля этой установки создана и действует 4-канальная неодимовая установка «Луч» [10].

По физике высоких плотностей энергии на установках «Искра-5» и «Луч» проводится большой цикл исследований ударной сжимаемости различных веществ [11], изоэнтропического расширения ударно сжатых веществ методом разгрузки в преграду [12], спектральных пробегов рентгеновского излучения в образцах из различных материалов, нагретых до температуры в несколько десятков эВ [13].

На установке «Искра-5» [14] также проводятся исследования физики работы мишеней непрямого сжатия в сферическом боксе-конверторе. Экспериментальные и расчётные исследования показали высокую симметрию облучения капсулы с ДТ-газом (неоднородность рентгеновского потока на её поверхности меньше 2–3%). При этом эффективная температура рентгеновского излучения составляет 160–180 эВ. Высокая степень симметрии позволила получить в экспериментах плотность сжатого ДТ-газа на уровне 0,8–1,1 г/см³ и достичь объёмного сжатия $\delta \approx 10^3$. Нейтронный выход изменялся в зависимости от условий экспериментов от 10^7 до 10^{10} . Расчётный анализ показал, что генерация нейтронов удовлетворительно описывается в рамках сферически симметричных расчётов.

В настоящее время во РФЯЦ-ВНИИЭФ выбрана и обоснована схема канала мегаджоульной установки, позволяющей реализовать основные параметры по энергии и временной форме лазерного импульса, и определен облик установки. Разработана 3D модель камеры взаимодействия с системой ввода лазерного излучения. Обоснован выбор системы ввода лазерной энергии в камеру взаимодействия, обеспечивающей высокую степень симметрии облучения термоядерной мишени $\epsilon_{\text{rms}} < 1\%$ и позволяющей работать как с рентгеновскими мишенями в сферическом или цилиндрическом боксах, так и с мишенями прямого воздействия.

Созданы стенды входного контроля оптических элементов и отработки штатных узлов установки. Назначение стендов – входной контроль крупногабаритной оптики (активные элементы, линзы, зеркала, адаптивные системы) и высоковольтных элементов емкостного накопителя энергии на соответствие требованиям ТЗ, а также отработка составных частей установки и алгоритмов управления.

Завершены работы по проектированию здания для размещения установки.

- [1] ITER Concept Definition. 1990. V.2.
- [2] Басов Н.Г., Крохин О.Н. // ЖЭТФ. 1964. Т. 45, С. 171.
- [3] Nuckols J., Wood L., Thiessen A. et al. // Nature. 1972. V. 239. P. 139.
- [4] Ильяев Р.И., Гаранин С.Г. // Вестник РАН. 2006. Т. 76, № 6. С. 503.
- [5] Moses E.I. and the NIC Collaborators. // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. P. 104020.
- [6] Анненков В.И., Багрецов В.А., Гайдаш В.А. и др. // Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 5, С. 536.
- [7] Zhu Q., Zheng W., Wie X., et al. // Proc. of SPIE. 2013. V. 8786. P. 87861G-1.

-
- [8] Andre M.L. //Proc. of SPIE. 1997. V. 3047. P. 38.
- [9] Belkov S.A., Garanin S.G. // Summaries of 15th Intern. Conf. on Laser Optics. 2012. P. R5-27.
- [10] Гаранин С.Г., Зарецкий А.И., Илькаев Р.И. и др. // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, С. 299.
- [11] Альтшуллер Л.В. // УФН. Т. 85, № 2. С. 197.
- [12] Belkov S.A., Derkach V.N., Garanin S.G. et al // J. of Appl. Phys. 2014. V. 115, No. 3. P. 033506.
- [13] Бондаренко С.В., Гаранин Р.В., Жидков Н.В., Суслов Н.А. // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 1. С. 51.
- [14] Абзаев Ф.М., Бельков С.А., Бессараб А.В. и др. // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. С. 155.