

МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ ВНИИЭФ

С. Г. ГАРАНИН, Г. А. КИРИЛЛОВ

В 1970 г. в результате совместных работ РФЯЦ-ВНИИЭФ, ФИАН и ГОИ под руководством С. Б. Кормера и Г. А. Кириллова во ВНИИЭФ был разработан взрывной фотодиссоциационный лазер с энергией 1 МДж.

Бурное развитие технологий создания мощных лазерных установок дало толчок к активным исследованиям в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). Лидирующие позиции в этих исследованиях заняли национальные ядерные центры ведущих стран мира. Это было обусловлено тем, что процессы, протекающие в термоядерной лазерной плазме, во многих чертах схожи с процессами, характерными для работы термоядерных зарядов. Лазерные установки являются в настоящее время практически единственным инструментом, позволяющим разработчикам ядерных зарядов хотя бы частично восполнить отсутствие экспериментальных работ в соответствующих областях, а также проводить верификацию физических моделей в условиях действия Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний

В конце 1970-х гг. начала работать лазерная установка «Искра-4», на которой была получена максимальная на тот момент энергия лазерного импульса наносекундной длительности в одном пучке (2 кДж, $\tau_{\text{имп}} \approx 1$ нс). Позднее мощность этой установки была повышена до 10 ТВт за счет сокращения длительности лазерного импульса до 0,1 нс практически без потери энергии. На установке «Искра-4» был проведен большой цикл экспериментальных исследований по взаимодействию лазерного излучения с веществом.

Успешный опыт разработки и применения лазера «Искра-4» позволил создать лазерную систему следующего поколения — установку «Искра-5», пуск которой осуществлен в 1989 г. Это 12-канальный йодный лазер с суммарной энергией 30 кДж при длительности лазерного импульса 0,3 нс. Установка находится в 4-этажном здании, имеющем в плане вид «креста» размером 110×135 м (рис. 1). Лазерная мишень помещается в центр сферической камеры взаимодействия



Рис. 1. Здание установки «Искра-5»

диаметром 2 м. Двенадцать лазерных пучков, расположенных в пространстве симметрично относительно мишени, фокусируются на нее с точностью 10–50 мкм.

В экспериментах на установке «Искра-5» при облучении мишеней с внутренним вводом излучения получена рекордно горячая плазма с температурой ионной компоненты ~ 12 кэВ. Нейтронный выход достигал значений $\sim 10^{10}$ ДД-нейтронов за импульс. Зарегистрирована скорость полета оболочки помещаемой внутрь бокса сферической мишени $\sim 3 \cdot 10^7$ см/с. Нейтронный выход из таких мишеней не обнаруживал существенных отклонений от одномерного поведения вплоть до объемных сжатий $\sim 2 \cdot 10^3$. Высокая симметрия поля рентгеновского излучения внутри бокса-конвертора позволила впервые в мире провести серию экспериментов по исследованию влияния асимметрии на динамику термоядерных мишеней и генерацию ими нейтронов. Изучено как влияние асимметрии в начальной геометрии мишеней, так и влияние асимметрии потока рентгеновского излучения на поверхности мишени. Несмотря на то, что характер газодинамических течений при сжатии мишеней менялся в очень широком диапазоне, физические модели и математические методики, использовавшиеся для анализа опытов, удовлетворительно описывают результаты экспериментальных измерений.

Установка «Искра-5» до недавнего времени являлась крупнейшей в Европе.

Эксперименты на установке «Искра-5» выявили ограниченность ее возможностей в плане расширения исследований по проблеме ЛТС. В 1999 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ разработан проект лазерной установки нового поколения с параметрами лазерного излучения, позволяющими вплотную подойти к порогу зажигания.

При создании лазерных систем такого класса на первом этапе для проверки и отработки основных научно-технических решений необходимы менее масштабные установки, являющиеся прототипом (модулем) основной системы. Таким модулем стала 4-канальная неодимовая установка «Луч». В ее основу положены принципиально новые научно-технические решения. Так, для унификации элементов и повышения КПД лазера используется 4-проходная схема усиления. Лазерные каналы объединяются в блоки с единой системой накачки, что также повышает КПД. Схема усиления установки «Луч» имеет 2 силовых усилителя, в каждом канале которых располагается 9 пластин из неодимового фосфатного стекла. В поперечном сечении лазерный пучок представляет собой квадрат размером 20×20 см. Установка «Луч» располагается в

здании, которое имеет чистое помещение площадью около 600 м^2 с уровнем чистоты 300 пылинок в кубическом футе (рис. 2). Внутри него находятся сверхчистые боксы для силовых усилителей и оптики с уровнем чистоты 3 пылинки в кубическом футе.

Создание установки «Луч» потребовало кооперации практически всех ведущих лазерных центров России и организаций различной ведомственной принадлежности, имеющих необходимый технологический и производственный задел для разработки и поставки ряда уникальных элементов, узлов и систем. Установка создана на практически полностью отечественной элементной базе.

Один из ключевых элементов установки — пластины (активные элементы) из неодимового фосфатного стекла размером $260 \times 490 \times 40$ мм. В ВНИЦ «ГОИ им. С. И. Вавилова» разработана принципиально новая технология варки неодимового стекла, которая позволила примерно в 4 раза повысить его лучевую прочность. В настоящее время для установки следующего поколения созданы и проходят испытания опытные образцы активных элементов размером $400 \times 690 \times 40$ мм.



Рис. 2. Чистое помещение установки «Луч»

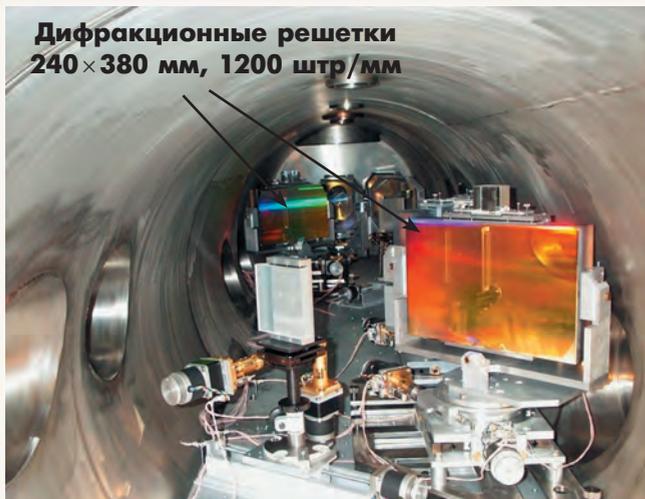


Рис. 3. Внутренний (слева) и внешний (справа) вид компрессора петаваттных лазерных импульсов

Разработана технология производства оптических элементов высокой (до 30 Дж/см^2 для зеркал и 15 Дж/см^2 для просветлений при $\tau_{\text{имп}} \approx 3 \text{ нс}$) лучевой прочности. Для системы энергопитания ламп накачки (конденсаторная батарея емкостью около 5 МДж) разработаны надежные коммутаторы на основе полупроводниковых реверсивно управляемых диодисторов. Они способны коммутировать токи до 300 кА . Технология их изготовления создана в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе. Для устройства развязки (оптической изоляции) многопроходной усилительной системы совместно с ИПФ РАН разработаны ячейки Поккельса с плазменными электродами световой апертурой до $300 \times 300 \text{ мм}$. Для компенсации aberrаций в многопроходной оптической системе установки «Луч» совместно с НПО «Луч» (г. Подольск) разработано широкоапертурное деформируемое (адаптивное) зеркало, которое на основании измерений структуры волнового фронта на выходе установки компенсирует наблюдаемые искажения.

На установке «Луч» получена выходная энергия $\approx 3,5 \text{ кДж}$ с канала при коэффициенте усиления слабого сигнала $0,045 \text{ см}^{-1}$ и длительности лазерного импульса 4 нс . Анализ показал, что выходная энергия установки близка к расчетно-ожидаемой. Таким образом, подтверждены основные разрабатываемые научно-технические решения.

Осуществлено преобразование лазерного излучения с выхода канала установки «Луч» во вторую гармонику. Ведутся работы по сглаживанию распределения интенсивности лазерного излучения на мишени. За счет применения специально разработанных киноформных фазовых пластин

получена неоднородность пятна облучения плоской мишени на уровне $3\text{--}5 \%$.

На установке «Луч» в настоящее время ведутся эксперименты по облучению мишеней различных типов излучением как первой, так и второй гармоник. В частности, на мишенях специального типа отрабатывается технология изучения уравнений состояния веществ при давлениях $10\text{--}100 \text{ Мбар}$. Достигнуты давления за фронтом ударной волны в свинце 50 Мбар . Начаты экспериментальные исследования известного явления — откола частей материала пластин, разгоняемых до скоростей $\sim \text{км/с}$. Достаточная частота проведения опытов, сравнительно малые размеры уничтожаемых частей мишени делают лазерные эксперименты удобным инструментом для отработки современных лазерных методов исследований быстропротекающих механических явлений.

Успешный опыт работы по разработке, выводу на рабочий режим и эксплуатации лазерной установки «Луч» позволяет обоснованно и на новом уровне подойти к проекту создания лазерной системы следующего поколения. Эта установка представляет собой твердотельный лазер на неодимовом фосфатном стекле и должна иметь следующие характеристики: энергия лазерного излучения $4,6 \text{ МДж}$ на основной гармонике $\lambda_{10} = 1054 \text{ нм}$, с преобразованием длины волны излучения во вторую гармонику, форма лазерного импульса профилированная длительностью $1\text{--}5 \text{ нс}$, число каналов 192 , однородность облучения мишеней прямого облучения $1\text{--}3 \%$. Параметры этой установки превосходят параметры создаваемых в национальных ядерных центрах США и Франции установок NIF и LMJ.

Проект создания новой установки носит национальный масштаб, его реализация даст мощный толчок к развитию современных наукоемких промышленных технологий.

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в разработке и создании твердотельных лазерных систем с ультракороткой (десятки и сотни фемтосекунд) длительностью импульса и мощностью светового излучения ~ 1 ПВт. При таких мощностях лазерного излучения в сфокусированном пучке достигается интенсивность $\sim 10^{18}$ – 10^{22} Вт/см², при этом энергия электрона в поле световой волны оказывается порядка энергии покоя. Такие релятивистские условия невозможно реализовать в лабораторных условиях другим способом. Появилась концепция «быстрого» зажигания термоядерной мишени при одновременном воздействии лазерного излучения наносекундной и пикосекундной длительности.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с ИПФ РАН на базе лазерного канала установки «Луч» создан петаваттный лазерный комплекс с энергией лазерного импульса ≈ 50 Дж при длительности импульса ≈ 50 фс. Особенностью этой установки является реализация принципа параметрического усиления широкополосных чирпированных (изменяющихся по частоте) лазерных импульсов в нелинейных кристаллах DRDP. Преимуществом данной схемы усиления, по сравнению с традиционной схемой усиления чирпированного импульса в оптических квантовых усилителях на неодимовом стекле, является существенно большая спектральная полоса усиления. Это позволяет усиливать более широкополосные чирпированные импульсы, и, как следствие, получать высокую (~ 1 ПВт) мощность лазерного излучения после компрессии при относительно небольшой энергии. Кроме того, в параметрической схеме ожидается высокий контраст лазерного импульса на мишени, так как до прихода на нелинейный кристалл параметрического усилителя импульса накачки ($\tau_{\text{нак}} \approx 1$ – 3 нс) на лазерную мишень никакого излучения не поступает.

На нашей установке импульсом накачки параметрических усилителей является преобразованное во вторую гармонику излучение лазера на неодимовом фосфатном стекле ($\lambda_{\text{нак}} = 527$ нм), в качестве сигнальной выбирается длина волны $\lambda_{\text{сигн}} = 910$ нм.

На рис. 3 показано одно из ключевых устройств установки — компрессор петаваттных лазерных импульсов. Размер вакуумной камеры компрессора $\varnothing 110 \times 500$ см. Для фокусировки лазерного пучка на мишень применяется внесоевое

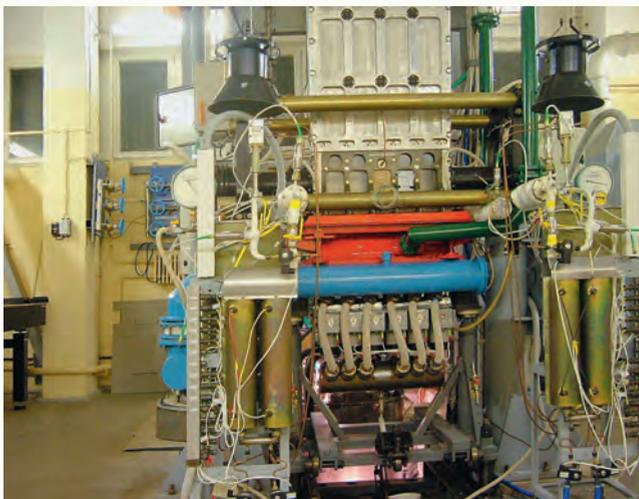


Рис. 4. Вид кислород-йодного лазера стенда «КИЛ-10»

параболическое зеркало с фокусным расстоянием 800 мм. Начаты эксперименты по облучению мишеней различных типов.

Наряду с приведенными выше работами ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ активно занимается исследованиями по физике мощных лазеров и развитию перспективных лазерных технологий. Получены важные результаты по созданию мощных взрывных фотодиссоционных йодных лазеров, импульсно-периодических химических HF (DF) лазеров, лазерных систем с диодной накачкой, химических кислород-йодных лазеров (рис. 4). Активно ведутся работы и имеются серьезные достижения в области повышения качества лазерных пучков с помощью нелинейной и адаптивной оптики.

В настоящее время ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ является одним из ведущих лазерных институтов России. Созданная стендовая база уникальна. Установки и полученные на них результаты как в области ЛТС так и в других областях физики высоких энергий соответствуют мировому уровню и позволяют обоснованно подходить к созданию и применению лазерных систем следующего поколения.

ГАРАНИН Сергей Григорьевич — директор ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ, член-корреспондент РАН, лауреат Государственной премии
КИРИЛЛОВ Геннадий Алексеевич — главный научный сотрудник ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ, лауреат Государственной премии