

С. Г. ГАРАНИН



С. Б. Кормер

Институт лазерно-физических исследований (ИЛФИ) занимается разработкой мощных лазеров различных типов и их применением. Началом лазерного направления работ во ВНИИЭФ можно считать 13 марта 1963 г. В этот день Ю. Б. Харитон провел первое совещание, посвященное лазерам. В 1965 г. была начата экспериментальная

работа с лазерами, которую возглавил начальник отдела 24 сектора 3 С. Б. Кормер.

В период с 1965 по 1980 г. во ВНИИЭФ в кооперации с ведущими научными, конструкторскими и производственными организациями страны был создан и испытан фотодиссоционный взрывной лазер с рекордной энергией лазерного излучения около 1 МДж. С помощью этого лазера проводились уникальные эксперименты по воздействию лазерного излучения на различные материалы. В частности, впервые экспериментально было показано, что лучевая прочность оптических элементов уменьшается с увеличением диаметра воздействующего лазерного пучка.

В 1970 г. было организовано специализированное лазерное подразделение ВНИИЭФ – сектор 13. Руководителем сектора был назначен С. Б. Кормер (с 1980 г. – член-корреспондент АН СССР). В 1970-х гг. тематика сектора 13 расширилась. Были выполнены уникальные разработки мощных химических фторводородных и газодинамических лазеров с рекордными характеристиками, а также методов уменьшения расходимости лазерного излучения путем применения эффекта обращения волнового фронта при вынужденном рассеянии Манделъштама – Бриллюэна (ВРМБ). В на-

чале 1980-х гг. проведены исследования мощных йодно-кислородных лазеров. В 2000-х гг. были начаты работы по исследованию лазеров на парах щелочных металлов с диодной накачкой. В 2011 г. впервые в мире на цезиевом лазере была получена мощность 1 кВт. В эти же годы было расширено и развито направление исследований, связанное с улучшением расходимости лазерного излучения методами адаптивной оптики и фазового сложения.

В начале 1970-х гг. начались работы по созданию мощных моноимпульсных лазерных установок для исследования в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) и физики горячей плотной плазмы. Первый моноимпульсный йодный лазер был построен в конце 1973 г. В 1980 г. создана мощная одноканальная установка «Искра-4» с энергией излучения около 2 кДж и длительностью импульса 0,5 нс. В 1981 г. на установке впервые получено $1,5 \cdot 10^5$ термоядерных DT-нейтронов. В 1989 г. была запущена крупнейшая в Европе лазерная установка «Искра-5» с мощностью 30 ТВт. На этой установке проведен широкий круг исследований мирового уровня.



Будущие ведущие сотрудники лазерного отделения у Ю. Б. Харитона (в центре). Слева направо: И. М. Быструев, Н. Н. Безнасюк, В. М. Муругов, Ф. В. Григорьев, В. Д. Урлин, С. А. Сухарев, В. Т. Ширнин, В. И. Ткачев, Г. А. Кириллов, С. Б. Кормер, М. В. Сеницын, А. И. Фунтиков, С. Д. Великанов



Г. А. Кириллов

В 1982 г. после безвременной кончины С. Б. Кормера подразделение 13 возглавил Г. А. Кириллов.

В связи с необходимостью дальнейшего развития в РФ работ по физике горячей плотной плазмы была поставлена на повестку дня задача создания лазерной установки нового поколения.

В 1996 г. сотрудниками

лазерного и теоретического подразделений при активной поддержке директора и научного руководителя ВНИИЭФ Р. И. Ильяева было выдвинуто предложение о создании неодимовой лазерной установки «Искра-6» с энергией 300 кДж. В 2001 г. при участии ведущих институтов страны создан уменьшенный прототип такой установки – 4-канальная установка «Луч».

В 2000 г. отделение 13 было преобразовано в Институт лазерно-физических исследований (ИЛФИ). С 2002 г. ИЛФИ возглавляет член-корреспондент РАН С. Г. Гаранин.

В последующие годы при формировании стратегии развития Госкорпорации «Росатом» по предложению директора ВНИИЭФ В. Е. Костюкова, при поддержке научного руководителя Р. И. Ильяева и одобрении руководителя ЯОК И. М. Каменских задача была переформулирована: создать для исследовательских целей

установку с энергией более 1 МДж и выйти на мировой уровень. Решение о создании установки в феврале 2012 г. было одобрено Президентом Российской Федерации В. В. Путиным. В настоящее время работы по этому проекту активно ведутся нашим ядерным центром в широкой кооперации с другими институтами и учреждениями страны. Рассмотрим историю основных разработок.



С. Г. Гаранин

Взрывные фотодиссоционные лазеры

В 1965 г. по инициативе Ю. Б. Харитона и Н. Г. Басова во ВНИИЭФ начались экспериментальные исследования по созданию лазеров с максимально достижимой энергией на базе взрывных фотодиссоционных лазеров (ВФДЛ), в которых для создания инверсии используется излучение фронта ударной волны, генерируемой в инертном газе взрывом ВВ. Эти работы выполнялись под руководством С. Б. Кормера большим коллективом исследователей.

Принципиальная схема ВФДЛ такова. В цилиндрический объем, ограниченный с торцов прозрачными плоскопараллельными пластинами, напускается смесь перфторалкилийодида (C_3F_7J) с ксеноном. При взрыве ВВ внутри лазерного объема распространяется ударная волна, излучение которой вызывает фотодиссоциацию йодида с образованием возбужденного йода. Тем самым в слое газа перед фронтом ударной волны создается инверсная населенность энергетических уровней атома йода, приводящая к лазерной генерации. На этом принципе во ВНИИЭФ в кооперации с ФИАН и ГОИ был создан лазер мегаджоульного уровня энергии при длительности импульса ~100 мкс. Параметры излучения этого лазера до 2007 г. оставались рекордными по уровню энергии для импульсных лазеров любого типа. Реализация проекта стала яркой иллюстрацией возможностей, которые открывает сочетание разрушительной силы взрыва и тонких когерентных свойств лазерного излучения. Основными характеристи-



Научно-технический совет ИЛФИ, 2000 г. Слева направо: Б. А. Выскубенко, С. В. Григорович, В. А. Ерошенко, С. М. Куликов, С. Г. Гаранин, В. Д. Урлин, Г. Г. Кочемасов, В. М. Муругов, С. А. Сухарев, Г. А. Кириллов, С. Д. Великанов, Ю. Д. Богуненко, Н. В. Жидков. В первом ряду: Н. Н. Безнасюк, В. М. Изгородин

ками лазера являются энергия и расходимость лазерного пучка, т. е. сила излучения. Расходимость излучения первых образцов ВФДЛ превышала дифракционную (минимально возможную) в тысячи раз. Исследования показали, что основными факторами, определяющими качество излучения, являются тип резонатора и оптические неоднородности среды в слое перед ударной волной. За счет оптимизации лазерной среды (оптические неоднородности были уменьшены на порядок) и разработки нового типа резонатора (с нерезонансной обратной связью и угловым селектором) удалось создать ВФДЛ с энергией излучения до 60 кДж при расходимости $\sim 10^{-4}$ рад, который до сих пор находит широкое применение в исследовательских программах. Разработка устройств обращения волнового фронта (ОВФ) при ВРМБ для компенсации оптических неоднородностей позволила получить на ВФДЛ практически дифракционную расходимость излучения и создать лазеры с рекордной силой излучения 10^{14} Дж/ср (10^{19} Вт/ср). Возможности по концентрации энергии излучения ВФДЛ с ОВФ наглядно продемонстрированы на установке «Лямбда» в рамках проекта МНТЦ по заказу Ливерморской лаборатории США: излучение взрывного лазера было сфокусировано в пятно размером порядка длины волны излучения ($\sim 1,5$ мкм), достигнута интенсивность излучения $3 \cdot 10^{18}$ Вт/см². Для импульсов наносекундной длительности это значение является рекордным.

Химические фтор-водородные лазеры

В 1970 г. по инициативе Ю. Б. Харитона и С. Б. Кормера были начаты исследования в области мощных химических лазеров, инверсия населенности в которых формируется в результате цепной химической реакции фтора с водородом (дейтерием). В химических лазерах энергия лазерного излучения черпается не столько из внешнего источника накачки, сколько из энергии, выделяющейся при протекании химических реакций в среде, обеспечивая высокий технический КПД. В результате экспериментальных работ была изучена физика химических лазеров, разработана технология работы с ними. Получены рекордные значения удельной энергии лазерного излучения, приходящейся на единицу объема активной среды, – 250 Дж/л.

Для большинства применений более перспективными являются неунитожжаемые системы, работающие в импульсно-периодическом режиме. Инициирование химической реакции в этом

случае обеспечивается свободными электронами, которые могут быть получены либо в ускорителе в виде электронного пучка, либо в электрическом разряде.

Успех создания эффективных импульсно-периодических химических лазеров основан на ряде научно-технических решений. Среди них:

- поперечное по отношению к резонатору инициирование реакции широким электронным пучком, создаваемым мощным ускорителем или электрическим разрядом;

- впервые разработанная технология создания потоков высококонцентрированных смесей на основе фтора и водорода.

Результатом работы стал химический лазер с энергией излучения в импульсе 6 кДж, расходимостью излучения, близкой к дифракционной, техническим КПД ~ 70 %, частотой следования импульсов 1–4 Гц.

Продуктивными оказались работы по излучению лазеров на нецепной реакции фтора с водородом (дейтерием), где в качестве фторсодержащего вещества применялся газ SF_6 , диссоциирующий в электрическом разряде. Для обеспечения длительной и безопасной работы лазера в импульсно-периодическом режиме созданы установки с замкнутым циклом смены рабочей смеси. Показана возможность получения в электроразрядном лазере на нецепной химической реакции расходимости излучения, близкой к дифракционному пределу, частоты следования импульсов до 1200 Гц и средней мощности излучения до 0,5 кВт.

Газодинамические лазеры

К началу 1970-х гг. резко возрос поток научных публикаций, посвященных исследованиям газодинамических лазеров (ГДЛ). Связано это было с тем, что первые же работы показали возможность создания газодинамических лазеров непрерывного действия на двуокиси углерода (CO_2) высокого уровня мощности. Такие лазеры могли найти применение в промышленности и оборонной технике. В газодинамических лазерах источником энергии излучения служит тепловая энергия молекулярного газа, равновесно нагретого до высоких температур. Инверсия получается в результате того, что различные колебательные моды молекул газа при быстром охлаждении релаксируют с различной скоростью. Для охлаждения используется сверхзвуковое расширение газа в соплах.

По инициативе С. Б. Кормера во ВНИИЭФ в 1974 г. развернулись исследования в этом на-

правлении. Была создана экспериментальная установка, в которой нагрев газа осуществлялся с помощью электрического разряда. Выбор физической схемы установки оказался настолько удачным, что в достаточно короткие сроки удалось исследовать энергетические характеристики ГДЛ для различных составов газов в широком диапазоне температур и давлений. Были получены данные в ранее недоступном диапазоне давлений и температур. Удельная энергия и приведенная мощность в два-три раза превышали значения, достигнутые в экспериментах другими группами исследователей.

Полученный набор данных определил энергетические возможности ГДЛ как физического прибора при любых способах нагрева рабочего газа. Рекордные удельные энергетические характеристики излучения ГДЛ достигнуты благодаря изобретению в РФЯЦ-ВНИИЭФ соплового блока с оригинальной системой смешения нагретого азота с рабочим газом (CO_2) и газом-релаксантом (He , H_2O).

Кислород-йодные лазеры

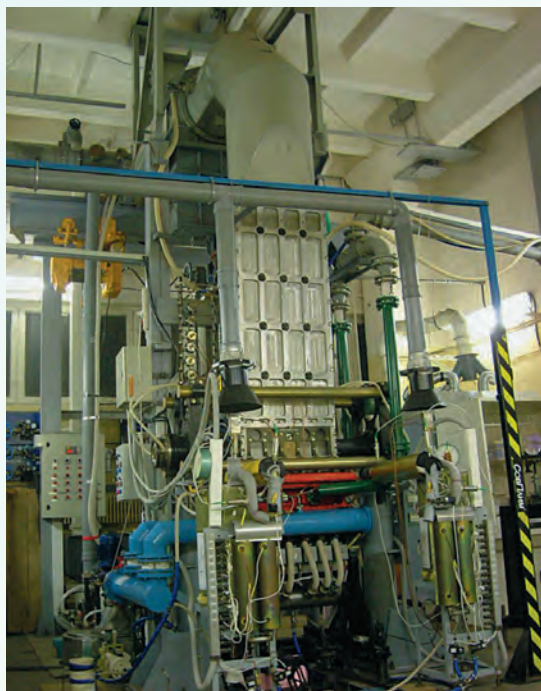
Химический кислород-йодный лазер (ХКИЛ) активно исследовался во многих лабораториях мира с начала 1980-х гг. Это единственный химический лазер, работающий на электронных переходах, благодаря чему его излучение обладает самой короткой для химических лазеров

длиной волны (1,315 мкм). Такое излучение хорошо проходит через атмосферу и через кварцевый световод, что дает значительные преимущества в различных применениях. Теоретические оценки показали, что лазер может иметь высокие удельные энергетические характеристики: удельный энергосъем более 500 Дж/г и мощность до 400 Вт, приходящуюся на квадратный сантиметр потока, что позволяет получать высокую мощность излучения с небольших устройств при малом расходе рабочих веществ. Поскольку для получения лазерного эффекта (инверсии населенностей) используется энергия химических реакций, то для его работы практически не требуется затрат электроэнергии, так как вся энергия запасена в химических реагентах. Указанные особенности ХКИЛ определяют широкие возможности его применения. Из промышленных применений широко обсуждалась возможность использования ХКИЛ для дистанционной разборки отслужившего свой век ядерного оборудования, благодаря возможности передачи мощного излучения ХКИЛ световодами на большие расстояния практически без потерь.

Итак, химический кислород-йодный лазер в силу высокой мощности и малой расходимости лазерного излучения, обусловленной хорошим оптическим качеством активной среды, являлся одним из перспективных типов лазеров. Однако в начале исследований высокие энергетические характеристики только следовали из теоретических оценок. Их еще предстояло получить экспериментально.

Во ВНИИЭФ исследования ХКИЛ развиваются с начала 1980-х гг. Энергетическим сердцем ХКИЛ является генератор синглетного кислорода (ГСК), в котором энергия, запасенная в химических реагентах, превращается в энергию, переносимую в лазерный резонатор молекулами кислорода, находящимися в синглетном (возбужденном) состоянии. В разработанном во ВНИИЭФ ГСК использована оригинальная идея закрученного аэрозольного потока в зоне химической реакции, что позволило получить высокий выход синглетного кислорода (до 90 %) при высоком рабочем давлении (0,3 атм) и рекордный поток запасенной лазерной энергии через поперечное сечение ГСК (более 2,2 кВт/см²). Химическая эффективность (КПД) разработанного генератора превышала 80 %, что также значительно превосходило КПД известных ГСК.

На основе этого типа ГСК в 2008 г. создан самый мощный в Европе кислород-йодный лазер с выходной мощностью излучения ~ 90 кВт.



Стенд кислород-йодного лазера

Благодаря использованию высокоэффективного ГСК и системы формирования активной среды, основанной на оригинальной идее смешения газов в параллельных потоках, полная химическая эффективность лазерной установки составила 40 %, что также превосходило эффективность лучших из опубликованных в научной литературе образцов. В результате проведенных исследований был разработан подход к масштабированию ХКИЛ.

Дальнейшие исследования показали, что применение неустойчивого резонатора позволяет получить излучение высокого качества ($M^2 \approx 2$), что демонстрирует высокую однородность лазерной среды. На созданном стенде ХКИЛ исследовались не только собственно лазер, но и свойства различных материалов в условиях облучения лазерным излучением.

Во ВНИИЭФ создана научная и технологическая база химических кислород-йодных лазеров, позволяющая создавать излучатели на основе ХКИЛ нового поколения с более высокими энергетическими характеристиками при меньших массах и габаритах, чем существующие в настоящее время.

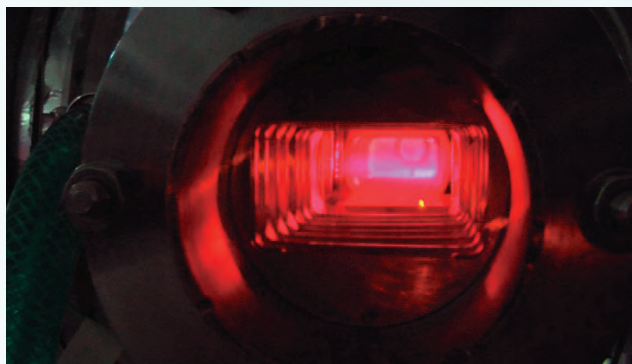
Лазер на парах щелочных металлов

В последнее десятилетие в различных странах мира (США, Россия, Китай, Япония, Израиль) ведутся исследования нового типа газовых лазеров непрерывного действия – лазеров на парах щелочных металлов (ЛПЩМ) с диодной накачкой. Лазер работает по трехуровневой схеме: свет накачки резонансно поглощается на переходе из основного состояния атома щелочного металла $n^2S_{1/2}$ в возбужденное $n^2P_{3/2}$. Для получения инверсии населенностей в активную среду добавляется буферный газ. При выполнении определенных условий между уровнями $n^2P_{1/2}$ и $n^2S_{1/2}$ возникает инверсная населенность и появляется возможность получения лазерной генерации на длине волны данного перехода ($\lambda = 894$ нм для цезия, $\lambda = 795$ нм для рубидия, $\lambda = 770$ нм для калия, $\lambda = 589$ нм для натрия).

Достоинствами ЛПЩМ являются:

- высокая квантовая эффективность: 95,3 % для цезия, 98,1 % для рубидия и 99,6 % для калия по сравнению, например, с 76 % для неодима. Это означает, что в лазере на парах цезия не более 5 % от мощности накачки пойдет в нагрев лазерной среды, в то время как в неодимовом лазере эта величина в 5 раз больше;

- возможность создания экологически чистой лазерной системы. Активная среда ЛПЩМ – это



Активная среда лазера

герметичный замкнутый экологически чистый контур.

Генерация лазерного излучения в ЛПЩМ была получена на парах калия, натрия, рубидия еще в 1980–1990-е гг., однако КПД комбинированной системы был малым. Ситуация существенно поменялась с появлением идеи накачки газовой лазерной среды, содержащей пары щелочных металлов, лазерными полупроводниковыми диодами, имеющими высокий КПД (В. Крупке, 2003 г.).

В РФЯЦ-ВНИИЭФ работы по исследованию ЛПЩМ были начаты в 2007 г.

Запущен в эксплуатацию первый в России экспериментальный стенд, демонстрирующий генерацию лазерного излучения на парах цезия (при накачке лазерными диодами).

Проведены работы по исследованию физических процессов в активной среде лазера, сопрождающих генерацию лазерного излучения.

Разработана и экспериментально апробирована расчетная модель, адекватно описывающая экспериментальные результаты.

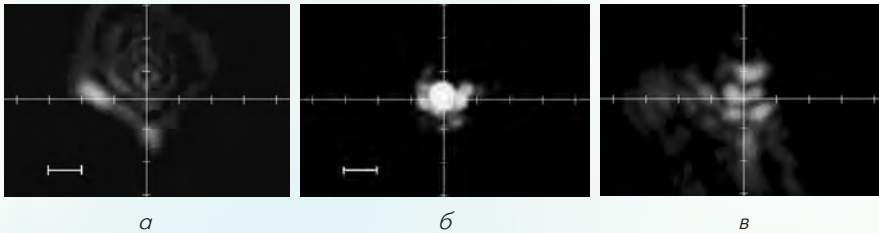
Результатом исследований явилось создание в 2011–2012 гг. первого в мире лазера на парах цезия с прокачкой активной среды через область генерации. Достигнута рекордная для лазера на парах цезия мощность генерации 1 кВт при эффективности света накачки в свет генерации 48 %. Результаты работы опубликованы в журнале *Квантовая электроника*, 2012, 42(2), 95–98.

Адаптивные оптические системы с новыми принципами управления

Современная адаптивная оптическая система (АОС) должна обеспечивать высокую точность фазовой коррекции изменяющихся во времени пространственных искажений волнового фронта лазерного излучения. В ИЛФИ были построены АОС, где коррекция фазового фронта проводит-



Схема адаптивной системы без ДВФ



Распределение интенсивности излучения в дальней зоне
в режиме off (а), on (б), stop (в)

ся гибким зеркалом с использованием итерационного стохастического параллельного градиентного алгоритма типа предиктор-корректор, связанного с поиском экстремума заданной целевой функции.

Целью работы АОС с датчиком волнового фронта (ДВФ) является получение волнового фронта излучения, максимально близкого к плоскому. Поскольку при этом размер пятна в дальней зоне должен быть минимальным, а яркость излучения – максимальной, то можно решать непосредственно задачу поиска экстремума соответствующей целевой функции, не измеряя волновой фронт.

Мгновенные пространственные картины излучения в дальней зоне в различных положениях АОС иллюстрируют высокую концентрацию мощности при включении АОС.

Воздействие лазерного излучения на вещество

Во ВНИИЭФ созданы различные импульсные, частотно-импульсные и непрерывные лазеры с выходной энергией до десятков и даже сотен килоджоулей, с длинами волн излучения от видимого до далекого инфракрасного света и временем воздействия на мишень в диапазоне от 10^{-12} до 1 с. Разработанные устройства дали воз-

можность изучения особенностей физических процессов, возникающих при взаимодействии излучения с веществом. Исследованы линейные и нелинейные процессы взаимодействия излучения с плазмой, газовыми и конденсированными средами. Эксперименты с высокоэнергетичными лазерами позволили определить масштабные эффекты при воздействии как на прозрачные, так и на непрозрачные материалы.

Например, при создании ВФДЛ с выходной энергией излучения 1 МДж потребовались оптические элементы с апертурой 1,3 метра. Исследования пробы и лучевой стойкости оптических сред при больших, порядка десятков сантиметров, пятнах облучения показали, что стекло К8, из которого изготовлялся резонатор лазера и другие оптические элементы, имеет лучевую прочность ~ 100 Дж/см² при длине импульса ~ 100 мкс, что и позволило создать лазер с энергией излучения порядка 1 МДж. Другим примером является выявление сильной зависимости механического импульса,

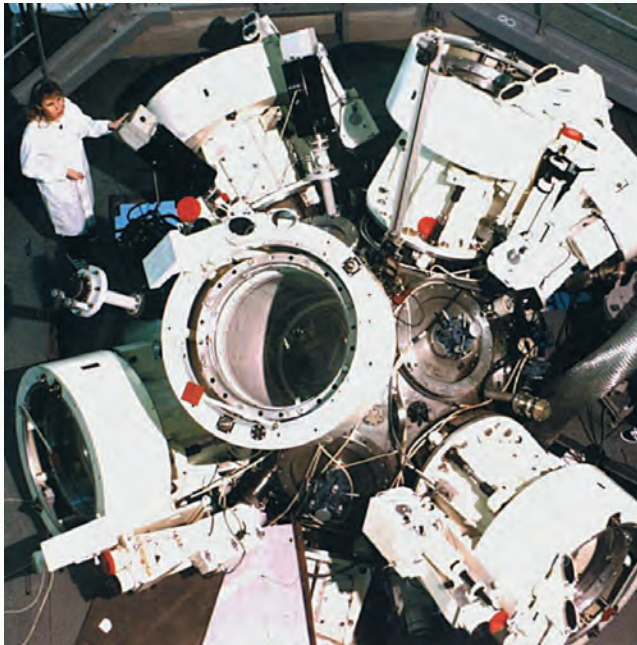
приобретаемого мишенью при облучении лазером, от размера пятна облучения.

ВНИИЭФ был в числе пионеров исследований по плазменной аэродинамике. Основная идея плазменной аэродинамики заключается в следующем. С целью влияния на характеристики обтекающего газового потока вблизи поверхности летательного аппарата и для улучшения аэродинамических параметров этого аппарата предлагается создавать перед ним или на его несущих поверхностях плазменные образования. Плазму можно получить, используя дистанционный подвод энергии (лазерной, СВЧ) с Земли или применяя бортовые источники. Во ВНИИЭФ создан уникальный лазерный стенд, на котором выполнены пионерские эксперименты по комбинированному воздействию на материалы лазерного излучения и набегающего газового потока. Проведены теоретические исследования по дистанционному подводу лазерной энергии в поток в сверхзвуковой трубе для изменения аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов.

Одновременно с экспериментами проводятся теоретические исследования физических процессов, сопровождающих взаимодействие излучения с веществом. Созданы и продолжают развиваться расчетные модели, адекватно описывающие наблюдаемые процессы.



а



б

Мощная 12-канальная лазерная установка «Искра-5»: а – здание установки; б – камера взаимодействия

Мощные лазерные установки для исследования физики термоядерной плазмы

В начале 1960-х гг. вслед за мазером Н. Г. Басова, А. М. Прохорова, Ч. Таунса был создан первый лазер (Т. Х. Майман). Это событие привлекло внимание ученых, в том числе из ведущих ядерных центров мира. Возможность фокусировать лазерное излучение в малые размеры и получать при этом высокую плотность энергии и мощности инициировала волну предложений об использовании лазеров для решения проблемы термоядерного синтеза в лабораторных условиях. Одно из первых предложений исходило от А. Д. Сахарова, который, узнав о появлении первого лазера, предложил на семинаре в теоретическом отделении ВНИИЭФ эллиптическую схему лазерного облучения маленькой оболочки,

содержащей термоядерное топливо. В 1968 г. С. Б. Кормер, Н. А. Попов и Н. Б. Бабичев впервые рассмотрели схему непрямого облучения мишени (МОК), когда лазерное излучение вводится через отверстия внутрь сферического бокса, в центре которого располагается сферическая оболочка-мишень, содержащая дейтерий и тритий. Симметричное облучение мишени происходит от внутренней поверхности бокса. Экспериментальные работы по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) начались в 1972 г. по инициативе С. Б. Кормера и Г. А. Кириллова при активной поддержке Ю. В. Харитона, который придавал большое значение созданию лазерных установок с мощностью излучения в сотни тераватт.

В результате активной работы сотрудников института в кооперации со многими учреждениями страны в РФЯЦ-ВНИИЭФ появилось целое семейство мощных моноимпульсных установок «Искра». В 1975 г. была создана йодная установка «Искра-3» (УФЛ-3) с выходной мощностью $P \approx 1$ ТВт. На ней проводились эксперименты по определению условий самовозбуждения усилителей при постановке термоядерной мишени в фокальную область фокусирующей системы, а также отрабатывались методики диагностики термоядерной плазмы. В 1979 г. начала работу 10-тераваттная одноканальная установка «Искра-4» с энергией лазерного импульса (E_L) до 2 кДж и длительностью $\tau_L \approx 100\text{--}300$ пс, на которой сферическая термоядерная мишень освещалась четырьмя лазерными пучками на длине волны 1,315 мкм. В экспериментах на этой установке получен рекордный для России выход термоядерных нейтронов $\sim 10^8$ на мишенях прямого облучения (МПО) и $\sim 2 \cdot 10^9$ ДТ-нейтронов на мишенях типа МОК. В мишенях МОК была достигнута температура ионов ДТ 7 кэВ. В 1989 г. была запущена 12-канальная установка «Искра-5» мощностью 120 ТВт, не имеющая аналогов в Европе и Азии (по мощности ее превосходила лишь установка NOVA в США). «Искра-5» стала основой экспериментального комплекса, включающего в себя камеру взаимодействия с фокусирующей оптикой и средства диагностики плазмы. Основными были исследования работы мишеней непрямого (рентгеновского) облучения. Исследовались взаимодействие лазерного излучения с плотной плазмой, физические процессы в горячей и плотной плазме и магнитосферных бурях. На установке также решаются задачи тестирования программ радиационной газовой динамики, разрабатываемых во ВНИИЭФ.

Основные результаты исследований сводятся к следующему. Выбрана конструкция сферического бокса-конвертора и отработана система ввода лазерного излучения внутрь бокса. Проведена серия экспериментов с мишенями МОК. В опытах получена рекордно горячая плазма с температурой ионной компоненты ~ 12 кэВ. Выход ДД-нейтронов за импульс достигал значений $\sim 10^{10}$.

Описать один из экспериментов этого типа можно таким образом. Двенадцать световых пучков с энергией 10000 Дж в импульсе, длительность которого измеряется одной трехмиллиардной долей секунды, вводятся внутрь полости диаметром 2 мм через шесть отверстий диаметром 0,6 мм. Стеклоянная сферическая оболочка, находящаяся в полости и имеющая диаметр 0,3 мм, схлопывается со скоростью примерно 300 км/с, сжимает находящуюся в ней ДТ-смесь и нагревает ее до температуры 30 миллионов градусов, что приводит к протеканию термоядерной реакции.

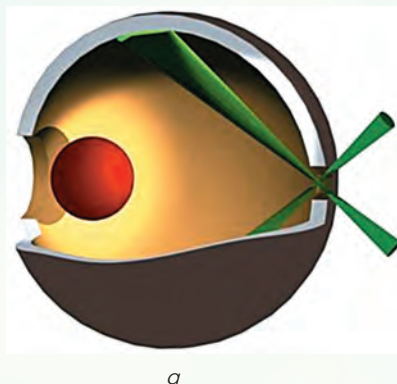
Высокая симметрия поля рентгеновского излучения позволила впервые в мире провести серию экспериментов по исследованию влияния асимметрии на динамику сжатия термоядерных мишеней и генерацию ими нейтронов. Изучено как влияние асимметрии в начальной геометрии мишеней, так и влияние асимметрии потока рентгеновского излучения на поверхности мишени. В ходе этих работ были развиты современные методы диагностики плазмы, в частности, базирующиеся на рентгеновских электронно-оптических преобразователях (РЭОП) с временным разрешением ~ 30 пс. Для анализа экспериментов потребовались развитие и модернизация одномерных и двумерных программ радиационной газовой динамики. Созданы методы расчета генерации и переноса рентгеновского излучения в лазерной плазме с использованием спектрально-диффузионного приближения, а также метода кинетического уравнения. Эксперименты позволили проверить адекватность и точность физических моделей, разработанных алгоритмов и расчетных программ.

Хорошая и стабильная симметрия рентге-

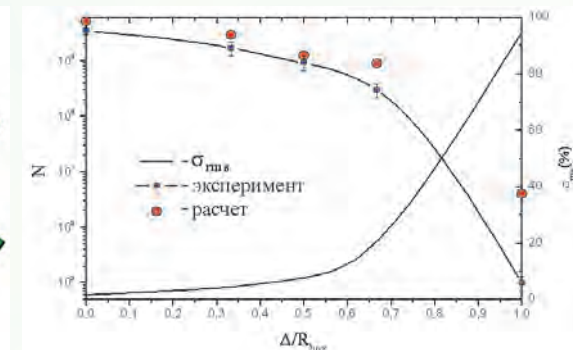
новского излучения в сферическом боксе дала возможность провести исследования влияния крупномасштабной контролируемой асимметрии на динамику сжатия мишени и нейтронный выход. Асимметрия создавалась нарушением однородности рентгеновского поля на поверхности сферически-симметричной стеклянной капсулы. Сравнение экспериментальных результатов с результатами газодинамических расчетов сжатия центральных капсул по программе МИМОЗА-НД с параметрами мишени и рентгеновского импульса, соответствующими эксперименту, позволяет констатировать качественное и количественное согласие между экспериментальными и расчетными данными в широком диапазоне изменения асимметрии рентгеновского поля. Результаты сравнения показывают, что, несмотря на чрезвычайно широкий диапазон изменения характера газодинамического течения, наблюдается удовлетворительное согласие расчетного и экспериментального значений нейтронного выхода и времени сжатия капсулы с ДТ-газом.

На лазерной установке «Искра-5» проводятся также исследования отдельных процессов, которые в конечном итоге определяют физику работы мишени. При этом перед исследователями ставится задача по совершенствованию диагностических методик с целью повышения их пространственно-временного и спектрального разрешения. С этой целью на установке «Искра-5» развиваются исследования по созданию лабораторного рентгеновского лазера (лазера с длиной волны излучения в рентгеновской области). В 2001 г. удалось впервые в России продемонстрировать его работу.

Выполненные работы убедительно демонстрируют эффективность использования лазер-



а



б

Мишень МОК для исследования влияния асимметрии поля рентгеновского излучения на динамику ее работы (а) и зависимость нейтронного выхода и степени неоднородности рентгеновского поля на поверхности капсулы от сдвига мишени (б)

ных установок для исследования явлений, протекающих в горячей плотной плазме.

Признанием значимости для мировой науки установки «Искра-5» и полученных на ней результатов явилось присуждение руководителю этих работ профессору Г. А. Кириллову почетной премии – медали Э. Теллера.

Лазерная установка «Луч»

Для проверки и отработки основных научно-технических решений, необходимых для создания более крупной (по сравнению с «Искра-5») мегаджоульной установки, была создана четырехканальная неодимовая установка «Луч», запущенная в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 2001 г. при участии ведущих организаций страны. Установка «Луч» располагается в специальном здании, в помещении площадью ~600 м² и уровнем чистоты 300 пылинок в кубическом футе. Внутри имеются сверхчистые боксы для силовых усилителей и оптики с уровнем чистоты три пылинки в кубическом футе.

Энергия излучения с канала составляет 3,3 кДж на основной частоте и 2 кДж на второй гармонике при длительности лазерного импульса 2–4 нс.

Достижение петаваттного уровня мощности лазерного излучения

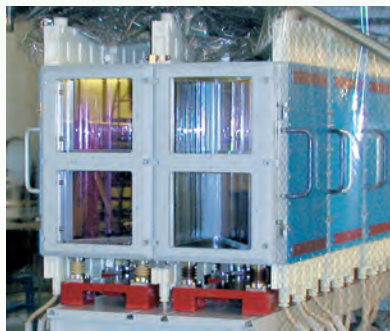
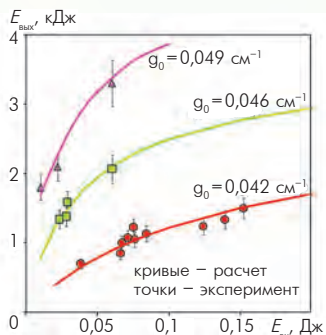
Лазеры петаваттного (10¹⁵ Вт) уровня пиковой мощности – один из передовых рубежей современной науки, открывающий широкие горизонты для новых практических приложений и уникальных фундаментальных исследований. При фокусировке петаваттного лазерного импульса фемтосекундной длительности в маленькое пятно достигаются гигантские значения интенсивности светового излучения – 10¹⁹ Вт/см² и выше,



Оптический зал установки «Луч»

при этом напряженность электрического поля на несколько порядков превосходит внутриатомное значение, а плотность энергии и световое давление больше соответствующих значений внутри Солнца или в эпицентре ядерного взрыва. Петаваттные лазеры позволяют создавать и изучать не достижимые ранее в лабораторных условиях экстремальные состояния вещества, осуществлять ускорение заряженных частиц до ультрарелятивистских энергий, получать сверхкороткие импульсы рентгеновского и гамма-излучений высокой яркости. Они завоевывают области перспективных применений в ускорительной технике, энергетике, биомедицине, диагностике, военно-технических приложениях.

В настоящее время в мире существует около 20 петаваттных лазерных комплексов, работающих на основе метода усиления импульсов с широкополосной линейной частотной модуляцией (так называемых чирпированных импульсов). В ИЛФИ совместно с Институтом прикладной физики РАН (ИПФ РАН) введена в строй лазерная система петаваттного уровня мощности со сверхкороткой (50–70 фс) длительностью лазерного импульса. В схеме установки наряду с традиционными для генерации сверхсильных полей принципами временного растяжения и компрессии усиленных импульсов используется принцип многокаскадного параметрического усиления в нелинейных кристаллах DKDP (дейтерированный дигидрофосфат калия), накачка которых производится преобразованным во вторую гармонику излучением лазера на неодимовом стекле (ОРСРА). В проведенных в РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с ИПФ РАН исследованиях была впервые сформулирована, развита и



$E_{\text{вх}} = 3,3 \text{ кДж}$ $S = 20 \cdot 20 \text{ см}^2$ $\tau_l = 4 \text{ нс}$ $\Theta = 2 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ $B \leq 1,8$ $r_{\text{rms}} = 0,6 \text{ мкм}$

Вид 4-канального усилительного модуля установки «Луч» (справа), зависимость выходной энергии лазерного излучения от энергии на входе (слева)

экспериментально проверена концепция ОРСРА в условиях сверхширокополосного синхронизма в кристаллах DKDP. Эта схема признана сегодня во всем мире в качестве наиболее многообещающей для освоения новых рубежей мощности и интенсивности лазерного излучения.

В запущенной петаваттной лазерной системе «Фемта» для накачки выходного параметрического усилителя применяется преобразованное во вторую гармонику излучение одного канала лазерной установки «Луч». Полный коэффициент усиления в четырех каскадах параметрического усиления составил около 10^{11} . Полученные значения энергии chirпованного импульса и коэффициента усиления являются рекордными для подобных лазерных систем. Компрессор петаваттных лазерных импульсов сконструирован по однопроходной схеме на основе четырех дифракционных решеток с золотым покрытием. Длительность скомпрессированного импульса составляла от 45 до 70 фс. При энергии накачки в диапазоне от 350 до 850 Дж пиковая мощность изменялась от 100 до 550 ТВт. Петаваттный уровень мощности достигался при энергии накачки 1100 Дж.

Таким образом, впервые в мире реализован новый подход к созданию источников лазерного излучения петаваттной импульсной мощности, основанный на использовании вместо лазерного параметрического способа усиления когерентного светового излучения фемтосекундной длительности в широкоапертурных нелинейно-оптических кристаллах.

Исследования уравнения состояния веществ

Как известно, теоретические модели уравнений состояния веществ требуют экспериментальной проверки. Пальма первенства здесь принадлежит динамическим методам, использующим мощные ударные волны для сжатия и необратимого разогрева вещества во фронте мощных ударных волн. Для их генерации используется широкий спектр различных энергетических устройств: конденсированные химические взрывчатые вещества, легкогазовые пушки, электродинамические ускорители, пучки релятивистских ионов и концентрированное лазерное излучение. В последнем случае, в лабораторных условиях можно реализовать экстремальные давления в десятки и сотни мегабар, недоступные для других техник генерации, за исключением лишь ядерных испытаний, на проведение которых в настоящее время действует мораторий.

Исследования уравнения состояния различных веществ проводятся в ИЛФИ на установках «Луч» и «Искра-5». В первом случае используется метод генерации ударного возмущения при облучении мишеней лазерным излучением, во втором – с конверсией лазерного излучения в рентгеновское. Специфика исследований по ударной сжимаемости и адиабатическому расширению веществ на лазерных установках сопряжена с микромасштабами эксперимента для инициирования мультимегабарных давлений. Параметры такого эксперимента определяются значением потока на мишени 10^{14} – 10^{15} Вт/см² и предъявляют требования к лазерному пучку: энергия ~1 кДж, длительность импульса 2–3 нс и размер пятна облучения в несколько сотен микрон. Малые масштабы области взаимодействия подразумевают высокие требования к качеству всех основных систем эксперимента: мишени, пятну, точности регистратора, а также к методике измерения. Проведены систематические исследования состояний ударно-сжатых веществ: Al, Cu, Pb, Fe, Ta, Au и ряда других в диапазоне давлений от 5 до ≈ 50 Мбар. Измерены энтропии расширения меди, предварительно сжатой сильной ударной волной, из состояний с давлением от 4 до 8 Мбар. Во всех случаях получено уверенное согласие результатов экспериментов с известными табличными данными.

Взрывомагнитные генераторы

Наряду с традиционными, в ИЛФИ развивается электрофизическое направление исследований. Основу этого направления составляют взрывомагнитные генераторы энергии (ВМГ) для термоядерных и физических исследований замагниченной высокотемпературной плазмы и физики высоких плотностей энергии.

Известно два основных типа ВМГ – спиральные (СВМГ) и дисковые (ДВМГ). СВМГ работают на относительно большие индуктивные нагрузки, но уступают дисковым генераторам по энергетическим характеристикам. За последние годы достигнуто значительное продвижение в разработке обоих типов генераторов. Применение новой методики проектирования СВМГ позволило отказаться от проведения серий предварительных экспериментов и, таким образом, существенно сократить как финансовые, так и временные затраты на разработку генераторов. Создание данной методики позволило довести технологию СВМГ до коммерческого продукта, востребованного ведущими научно-исследовательскими лабораториями мира. Созданные в

1980-х гг. ДВМГ семейства «Поток» могут генерировать токи до 300 МА за время 4–12 мкс. Новое поколение ДВМГ с плоскими дисками и инертными вставками в полостях сжатия магнитного потока



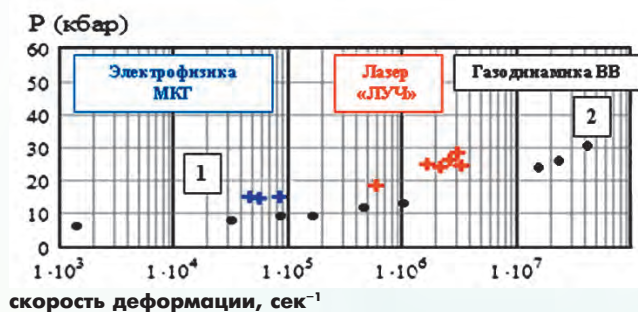
Внешний вид гофрированного ФРТ

отличается простотой конструкции и высоким коэффициентом перевода энергии ВВ в энергию магнитного поля (вдвое выше значения для прототипа). Для формирования импульсов тока с микросекундным временем нарастания применяется устройство, состоящее из ДВМГ и фольгового размыкателя тока (ФРТ). Размыкатель представляет собой медную фольгу, размещенную между изоляторами в передающей линии ДВМГ. Разработана и испытана новая конструкция ФРТ, в котором медная фольга укладывается полосками между двумя гофрированными радиальными изоляторами. Конструкция проста, надежна и позволяет значительно уменьшить габариты и индуктивность всего устройства.

СВМГ нашли применение для исследования реологических свойств материи. Наиболее известна серия из десяти экспериментов R-Damage по изучению динамического разрушения в сходящейся геометрии с использованием СВМГ в качестве драйвера цилиндрического алюминиевого лайнера, создающего осесимметричное ударное воздействие на исследуемую мишень, проведенных совместно ВНИИЭФ и ЛАНЛ. Целью экспериментов являлось исследование зарождения и развития откольного разрушения, а также компактирования поврежденности в экструдированном алюминии марки АІСАН. Серия экспериментов R-Damage продемонстрировала перспективность применения импульсных источников мощности на основе ВМГ для создания в конструкционных материалах импульсных нагрузок контролируемой амплитуды и длительности. В частности, простота реализации режима с двумя последовательными нестационарными ударными волнами в мишени открывает широкие возможности исследования особенностей рассматриваемых процессов. В результате проведения серии экспериментов RHSR получены данные о динамической прочности полиэтилена (2–3 кбар, больше статической в ~20 раз), подтверждены данные о динамической прочности меди.

Наряду с этим разработаны программы работ, редакции экспериментов и созданы устройства для исследований: упругоэластических свойств бериллия; процессов пыления при выходе ударной волны на поверхность материалов, высокоточных уравнений состояния веществ при ударном нагружении давлением до 10 Мбар, процессов турбулентного перемешивания при торможении высокоскоростных (10–20 км/с) тяжелых оболочек (медь) на слое легкого материала (полиэтилен, вода).

Начаты совместные исследования реологических свойств материи на лазерных и электрофизических установках (зависимость откольного напряжения от скорости деформации, см. рисунок). Сочетание электрофизических и лазерных методов позволит проверить роль масштабных факторов, увеличит надежность и удешевит исследования.

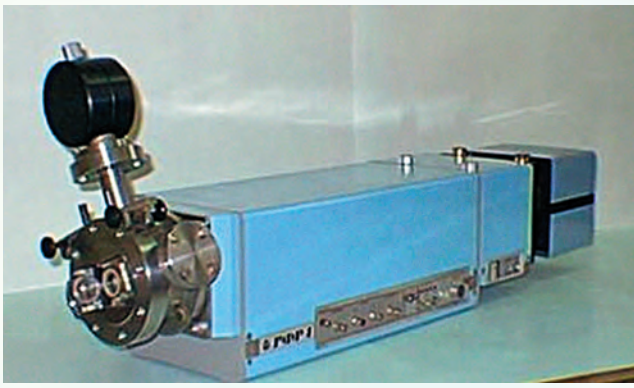


Зависимость откольного растягивающего напряжения от скорости деформации: 1 – алюминий АІСАН; 2 – алюминий АD1

Дальнейшее продвижение в область высоких плотностей энергии в экспериментах с ВМГ возможно при обострении импульса тока до ~100 нс. Такие устройства могут быть реализованы при организации на базе гофрированных ФРТ двух каскадов обострения тока. В случае реализации коротких (~100 нс) импульсов тока диапазон достижимых с применением ВМГ давлений приблизится к реализуемому на лазерных установках. Это позволит существенно расширить диапазон совместных исследований на лазерных и электрофизических установках, в частности, ставить задачу достижения термоядерного зажигания с применением ДВМГ.

Разработка измерительной аппаратуры и методик

Успехи ИЛФИ в работе по лазерной тематике в немалой степени обусловлены своевременным обеспечением проводимых исследований современной измерительной аппаратурой. В частно-



Рентгеновский фотохронограф РФР-4

сти, в ИЛФИ разработан и внедрен комплекс аппаратуры для измерения энергетических и пространственно-временных характеристик излучений мощных лазеров ИК-диапазона, обладающий уникальными возможностями: спектральный диапазон регистрируемого лазерного излучения 1,3–10,6 мкм, диапазон измеряемой энергии 10^2 – 10^6 Дж, мощности 10^3 – 10^{13} Вт, длительности – от 10^{-10} до 10 с.

Крупным достижением стало создание высокоскоростных ИК-регистраторов ПКИТ, КИТ и ЛВИТ, не имеющих аналогов в мире и применяемых как в нашей стране, так и за рубежом (США, национальные лаборатории в Ливерморе и Лос-Аламосе).

В ИЛФИ в период с 2009 по 2014 г. разработана и успешно применена новая лазерная оптогетеродинная методика (ОГМ) измерений параметров процессов, происходящих при газодинамических исследованиях. Был создан 32-канальный измерительный комплекс, удовлетворяющий всем требованиям эксплуатации в условиях взрывных экспериментов с двойным дублированием измерений, с полной гальванической развязкой от систем синхронизации, с автономным электропитанием и дистанционным управлением по оптоволоконным линиям связи. Была применена схема 4-кратного уплотнения регистрируемых сигналов: в 2 раза по частоте и в 2 раза во времени. Это позволило в 2,7 раза увеличить эффективность использования осциллографов.

Методика ОГМ является многопараметрической, позволяющей параллельно в одном эксперименте определять до 10 физических характеристик, представляющих интерес. Полученные результаты измерений могут быть использованы для тестирования имеющихся программ численного моделирования, в том числе симметрии и амплитуды ударно-волнового нагружения пла-

стины (оболочки) на начальной стадии движения; симметрии движения пластины (оболочки); размера и фазового состояния микрочастиц, объемной плотности, полной массы и пространственно-временной структуры впереди летящего облака пыли; откольной прочности и других реологических характеристик ударно-нагружаемых материалов.

Предварительная отработка комплекса проводилась на лазерной установке «Луч», где были исследованы различные особенности измерений скорости движения ударно-нагруженных мишеней в условиях пыления и откола тыльной поверхности. В процессе выполнения этой работы была исследована отражательная способность материалов на длине волны зондирующего излучения. С помощью методики ОГМ при испытании газодинамических макетов исследована структура летящего перед оболочкой облака пыли (впервые подобные измерения были выполнены еще в 1950-х гг. с помощью рентгенографии). Облако образуется при кумулятивном выбросе пыли из дефектов поверхности с размерами частиц ~ 1 мкм; твердых или жидкокапельных фрагментов откола с размерами частиц ~ 10 мкм; а также мелкодисперсной части облака с размерами капель $\sim 0,1$ мкм, образующимися в результате дробления крупных капель при движении в газе. Разработанная методика позволяет верифицировать программы расчета образования отколов и пыления материалов при их ударном нагружении.

Моделирование разрушения метеорита ядерным взрывом

Падение крупного метеорита представляет собой одну из самых больших катастроф для нашей планеты. Одной из возможностей ее предотвращения является заблаговременный запуск ракеты с ядерным зарядом и организация мощного взрыва на поверхности метеорита, приводящего к его дроблению на мелкие составляющие, не представляющие значительной опасности при попадании в атмосферу Земли.

В ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ предложен способ моделирования дробления метеорита, основанный на принципе геометрического и физического подобия этого процесса воздействием лазерного излучения. Предварительная серия моделирующих экспериментов была проведена в одном из каналов йодного лазера «Искра-5». В результате воздействия ЛИ достаточной энергии мишень (модель метеорита) распадалась на осколки различные по размерам и массе. Ис-

пользование приближенного критерия подобия показало, что ядерный взрыв с энергией около 6 Мт разрушит каменный метеорит (хондрит) диаметром ~ 200 м.

Разработка лазерной установки мегаджоульного уровня энергии

Мощная мегаджоульная лазерная установка нового поколения будет представлять собой стационарный лабораторный комплекс, который обеспечит высокий уровень плотностей энергии в горячей и плотной плазме. Детальная информация о свойствах вещества в этих условиях, которая может быть получена из экспериментов на такой установке, позволит расширить физическое понимание динамики процессов, происходящих при высокой плотности энергии. Сопоставление этой информации с результатами расчетов по существующим и модернизированным программам позволит также оценить полноту физических моделей, на которых базируются расчетные методики, и точность математических алгоритмов и программ, реализующих эти модели.

Комплекс разместится в отдельном специальном здании на территории ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». Создаваемая установка будет являться составной частью экспериментальной базы ЯОК России. Технические возможности мегаджоульной установки позволят проводить обширные экспериментальные исследования. С ее помощью в лабораторных условиях могут быть проведены:

- тестирование программ радиационной газовой динамики;
- пополнение базы данных свойств материалов при высоких давлениях и температурах;
- исследования в области фундаментальной физики;
- исследование динамики глубокого объемного сжатия термоядерных мишеней ($\delta \approx 10^4$) и получение 10^{16} термоядерных нейтронов.

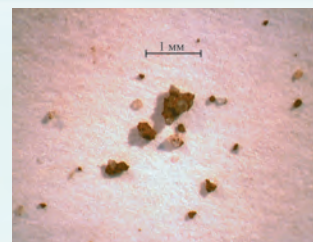
Проведение исследований на лазерной установке будет также способствовать поддержанию уровня знаний и квалификации нового персонала и позволит готовить новые научные кадры.

Заключение

Результатом 50-летней работы ВНИИЭФ по лазерному направлению стало создание уникальной, самой крупной в стране экспериментальной базы, являющейся достоянием научного сообщества России и коллектива специалистов-лазерщиков высокой квалификации. Проведено всестороннее изучение основ работы



Модель метеорита



Осколки, собранные после эксперимента

различных типов лазеров, созданы уникальные лазерные образцы, исследовательские стенды и установки, выполнены исследования по взаимодействию лазерного излучения с веществом. На лазерных установках получен целый ряд результатов мирового уровня. В кооперации с коллегами из различных научных институтов проведен широкий круг исследований по проблемам физики высоких плотностей энергии. Деятельность ИЛФИ заслужила признание мирового научного сообщества.

Лазерная стендовая база, созданная в Институте лазерно-физических исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ, уникальна. Она является достоянием научного сообщества России. На лазерных установках получен целый ряд результатов мирового уровня. Специалисты ИЛФИ в кооперации с коллегами из других научных институтов провели широкий круг исследований по проблемам физики высоких плотностей энергии.

Ученые лазерного института активно участвуют в воспитании нового поколения ученых и специалистов. ИЛФИ является базовым институтом для четырех кафедр в высших учебных заведениях: кафедры квантовой электроники СарФТИ, кафедры проблем инерциального термоядерного синтеза МФТИ, кафедры физики ЛТС НИЯУ МИФИ, кафедры квантовой радиофизики и лазерных систем ННГУ им. Н. И. Лобачевского.

Достижения ИЛФИ высоко оценены государством: 13 специалистов ИЛФИ стали лауреатами Государственной премии СССР, 11 – Государственной премии РФ, 43 – премии Правительства РФ, 9 – премии Правительства РФ для молодых ученых; 16 человек удостоены почетных званий, 60 – награждены орденами и медалями.

ГАРАНИН Сергей Григорьевич –

генеральный конструктор по лазерным системам – заместитель научного руководителя ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» по лазерно-физическому направлению – директор ИЛФИ, член-корреспондент РАН