

УСТАНОВКА «ИСКРА-5» И ПРОБЛЕМЫ ИТС

Н. В. ЖИДКОВ



Н. В. Жидков

С 1989 г. и вот уже 20 лет в ИЛФИ действует уникальная лазерная установка «Искра-5», предназначенная для изучения вопросов термоядерного синтеза, решения различных прикладных и оборонных задач.

Традиционное направление решения проблемы управляемого термоядерного синтеза — это сравнительно длительное удержание магнитным полем малоплотной горячей дейтерий-тритиевой (ДТ) плазмы. Иной подход, предложенный у нас акад. А. Сахаровым, акад. Н. Басовым и О. Крохиным, заключается в быстром нагреве плазмы с помощью лазера до термоядерных температур (сотни миллионов градусов) в расчете на то, что термоядерные реакции успеют произойти до того, как сгусток плазмы разлетится. То, что при этом должно произойти — не что иное, как термоядерный микровзрыв. Ввиду того, что время, отпущенное на протекание реакций, определяется в этом случае инерционностью плазменного сгустка, этот подход называют инерционным термоядерным синтезом (ИТС).

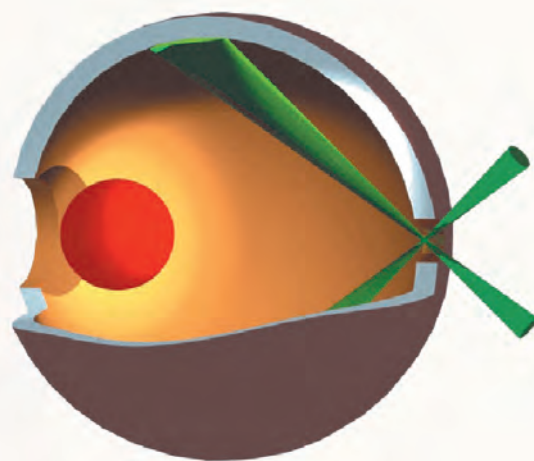
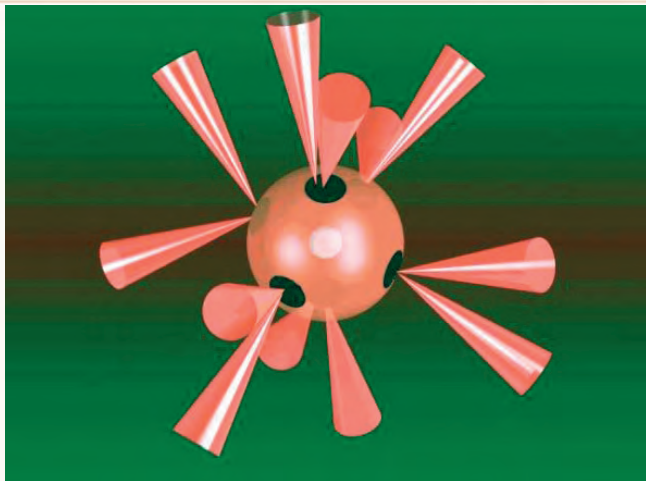
Бурное развитие этого направления началось в 1970-е гг., после того, как разработали конкретные технически реализуемые конструкции мишеней и схемы их облучения лазерным импульсом и было показано, что принципиально достижимы условия, при которых термоядерное энерговыделение превзойдет энергетические затраты на генерацию лазерного импульса. Для этого потребуется создать в мишени поистине «звездные» условия: плотность свыше 100 г/см^3 и температуру свыше 50 млн. градусов. Оценки необходимой для этого энергии непрерывно уточнялись, и по нынешним представлениям она составляет около двух мегаджоулей.

С начала развития широкомасштабных исследований по лазерному ИТС в разных странах бы-

ла построена целая серия лазеров с энергиями от сотен джоулей до сотни килоджоулей, на которых нарабатывалось понимание механизмов работы лазерных мишеней и уточнялись подходы к главной цели — зажиганию термоядерной реакции. Значительный вклад внесли в исследования по этой проблеме и российские ученые. Большой цикл экспериментальных и теоретических исследований был проведен на установках «Кальмар» и «Дельфин» в ФИАН под руководством акад. Н. Басова. В конце 1970-х гг. в исследования по проблеме лазерного термоядерного синтеза активно включился коллектив ученых из ВНИИЭФ под руководством С. Б. Кормера и Г. А. Кириллова. Особенностью работ этого коллектива была ориентация на лазеры, в которых активной средой является атомарный йод, тогда как монополярное положение в исследованиях по лазерному ИТС занимали и занимают в настоящее время лазеры на неодимовом стекле. Была сформулирована и начала осуществляться программа создания йодных лазеров все возрастающей мощности. Основными достижениями этой программы стали установки «Искра-4» на энергию лазерного излучения около килоджоуля и, наконец, «Искра-5», не уступающая на момент создания по мощности крупнейшей в мире установке «Nova» в США. В США и Японии исследования по лазерному термоядерному синтезу (ЛТС) ведутся с помощью неодимовых лазеров, обладающих целым рядом привлекательных свойств. Од-



Один из оптических залов



Мишени для установки «Искра-5»

нако они требуют изготовления в большом количестве элементов из высококачественного неодимового стекла и высоких капиталовложений в соответствующую отрасль промышленности. В то же время, при сравнительно умеренном уровне лазерной энергии (10–100 кДж), многие проблемные вопросы ЛТС можно исследовать с помощью фотодиссоционных йодных лазеров. Во ВНИИЭФ выбор йодного лазера был обусловлен большим опытом работы с фотодиссоционными лазерами, накачиваемыми светом фронта ударной волны, накопленным во ВНИИЭФ, ФИАН, ГОИ и НПО «Астрофизика». Уже в конце 1960-х гг. в таких лазерных установках была получена энергия излучения 10^6 Дж в импульсе длительностью 10^{-4} с.

Начиная с 1975 г. во ВНИИЭФ были широко развернуты расчетно-теоретические и экспериментальные работы по созданию модулей для усиления коротких световых импульсов, реализующих высокую плотность запасенной энергии лазерно-активной среды, обеспечивающей усиление импульсов субнаносекундной длительности и получение высокого контраста излучения. Наряду с этим необходимо было решить вопросы транспортировки лазерного излучения по оптическому тракту, создания и нанесения высокопрочных покрытий на крупноапертурные оптические элементы (диаметром 700–1200 мм), получения малой расходимости излучения и фокусировки его на мишень.

Эти исследования завершились созданием лазерного комплекса «Искра-5», введенного в эксплуатацию 24 октября 1989 г. По отзывам ведущих специалистов в области лазерной физики, «Искра-5» является уникальной техниче-ски со-

вершенной физической установкой с рекордными параметрами и отличается оригинальностью многих систем. По существу, создание установки «Искра-5» явилось крупнейшим достижением отечественной экспериментальной физики 1990-х гг., оно потребовало решения ряда сложных научно-технических проблем и явилось результатом напряженного труда целой кооперации научных и производственных организаций страны.

Мощный фотодиссоциационный йодный лазер «Искра-5» представляет собой 12-канальную систему с последовательно-параллельным усилением излучения на длине волны $\lambda = 1,315$ мкм. Генерация и усиление стимулированного излучения в таком лазере происходят при фотодиссоциации молекул алкилйодидов (в нашем случае C_3F_7J) с преимущественным образованием возбужденных атомов йода. Индуцированное излучение соответствует переходу ${}^2P_{1/2} - {}^2P_{3/2}$. Двенадцать усилительных каналов установки расположены на четырех этажах специально спроектированного здания, которое одновременно вмещает все технологические системы и коммуникации. При подаче на вход усилительного канала импульса излучения с энергией $\sim 0,4$ Дж энергия излучения на выходе достигает 2500 Дж. Характерное значение длительности лазерных импульсов, зарегистрированных на установке, составляет $t_{0,5} \sim 0,35$ нс при разбросе времен прихода на мишень в пределах $\Delta t \approx \pm 50$ пс. В 2003 г. установка была переведена на более эффективный режим работы во второй гармонике лазерного излучения.

Установка создавалась в тесном сотрудничестве с экспериментальным производством ВНИИЭФ и



Зал библиотеки ИЛФИ с абонентским пунктом Интернета

строительными организациями, а также со многими внешними организациями (МСМ, ФИАН, ИОФАН, НИИИТ, ВНИИОФИ, ЦНИИГАиК — г. Москва; ЛОМО, ГОИ, НИИЭФА, ГИПХ, НИИПиЭТ — г. Ленинград; ТРИНИТИ — г. Троицк; НИИОПИК — г. Долгопрудный; п/я 8088 — г. Н. Тагил; «Конденсатор» г. Серпухов; ОКБА — г. Ангарск).

За разработку лазерных установок серии «Искра» группе сотрудников ВНИИЭФ, НИИЭФА, ЛОМО и ФИАН была присвоена Государственная премия Российской Федерации (1997 г.) в области науки и техники.

Ввод в эксплуатацию двенадцатиканальной камеры взаимодействия и успешное проведение на ней первой серии экспериментов на мишенях с обращенной короной позволили провести в дальнейшем исследования сжатия ДТ-капсул в схеме непрямого облучения. Необходимость проведения различных специфических прикладных исследований потребовала создания серии одноканальных стендов, на которых эксперименты проводятся с использованием излучения одного или двух лазерных каналов. К концу 1990-х гг. установка была оснащена пятью стендами, на которых проводятся исследования по различным направлениям: вопросы взаимодействия плазмы с магнитным полем, генерации электромагнитных излучений, радиационный перенос энергии, исследование ударной сжимаемости веществ, исследование поглощательной и излучательной способности неравновесной плазмы, процессы турбулентного перемешивания, отработки принципов создания рентгеновского лазера.

Эксперименты на установке «Искра-5» убедительно продемонстрировали возможность полу-

чения экспериментальной информации и сопоставления ее с результатами расчетов в важнейших направлениях.

- Нагрев плазмы, образующейся при лазерном облучении внутренней поверхности сферического бокса, и генерация ею термоядерных ДТ и ДД нейтронов при кумуляции в центре бокса: получена плазма с температурой ионной компоненты до 10 кэВ, нейтронный выход составил около 10^{10} ДД нейтронов.

- Получение однородного рентгеновского поля излучения в замкнутых геометриях. В сферическом боксе-конверторе достигнуты: эффективная температура квазиравновесного рентгеновского излучения до ~ 170 эВ, а неоднородность облучения оболочки с ДТ-топливом менее 3 %.

- Сжатие и нагрев сферических оболочек, ускоряемых рентгеновским излучением: осуществлено сжатие ДТ-топлива до $2 \cdot 10^3$ раз и нагрев его до температур $\sim (2-3)$ кэВ; зарегистрирована скорость полета оболочки до $3 \cdot 10^7$ см/с; нейтронный выход достигал значения $\sim 10^{10}$ и не отличался более чем в 2–3 раза от получаемого в одномерных сферически симметричных расчетах.

- Влияние асимметрии в начальной геометрии оболочек или асимметрии рентгеновского потока на сжатие ДТ-топлива и генерацию нейтронов: исследовано влияние асимметрии в виде первой или второй сферических гармоник; зарегистрированное максимальное снижение нейтронного выхода за счет влияния эффектов асимметрии составило ~ 300 раз. Показано, что расчеты по двумерным программам радиационной газовой динамики, разработанным во ВНИИЭФ удовлетворительно описывают экспериментальные результаты.



Участники эксперимента у входа в здание установки

- Перенос рентгеновского излучения в цилиндрической геометрии и тепловой пробой материалов.

- Получение горячей (несколько кэВ) многозарядной плазмы и генерация ею резонансного рентгеновского излучения.

- Реабсорбция линейчатого рентгеновского излучения и спектральных характеристик плазмы элементов с $Z = 10-30$ методами эмиссионной К- L , L - M и M - N спектроскопии.

- Спектральные пробеги рентгеновского излучения.

- Ударная сжимаемость материалов и уравнение состояния.

- Физические процессы, сопровождающие взаимодействие плазмы с магнитным полем.

- Сверхвысокочастотный электромагнитный импульс, возникающий при воздействии рентгеновского излучения на образцы.

- Лабораторные рентгеновские лазеры.

Полученные результаты являются итогом работы большого коллектива экспериментаторов, теоретиков и математиков ИЛФИ и ИТМФ. За разработку методов и проведение экспериментальных исследований горячей и плотной плазмы на лазерной установке «Искра-5» пятнадцати сотрудникам ВНИИЭФ, в том числе и автору статьи, была присвоена премия Правительства Рос-

сийской Федерации (2001 г.) в области науки и техники.

Результаты, полученные специалистами ВНИИЭФ, наряду с работами зарубежных коллег, показали необходимость экспериментов на мощных импульсных установках в исследованиях процессов в веществе при экстремальных условиях. И хотя перспективы ИТС с точки зрения практического использования энергии термоядерного синтеза достаточно отдаленны, в настоящее время исследования (как экспериментальные, так и расчетно-теоретические) на мощных лазерных установках вносят заметный вклад в получение новых знаний в области высоких плотностей энергии, физики плазмы и атомной физики, развития и совершенствования новых технологий.

Очень важно, что результаты экспериментов на установке «Искра-5» позволяют разработать детальную и обоснованную программу прикладных исследований для установок следующего поколения.

ЖИДКОВ Николай Васильевич —
начальник отдела ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ,
доктор физико-математических наук,
лауреат премии Правительства РФ