

УДК 621.378.9

Исследования по термоядерному синтезу на мощных лазерных установках

Р. И. Илькаев, С. Г. Гаранин

Рассмотрены результаты исследований РФЯЦ-ВНИИЭФ по физике сжатия термоядерных мишеней, приведены оценки параметров лазерных установок, которые требуются для зажигания термоядерного топлива, обсуждаются результаты экспериментальных исследований динамики сжатия мишеней непрямого облучения на установке "Искра-5". Рассмотрены проекты создания мощной лазерной установки мегаджоульного уровня "Искра-6" и петаваттной фемтосекундной лазерной системы.

Введение

В основе термоядерного синтеза лежат реакции слияния (синтеза) ядер легких элементов с образованием более тяжелых и выделением избыточной энергии. Проще всего осуществить синтез тяжелых изотопов водорода – дейтерия и трития в реакции $D + T = {}^4\text{He} + n + 17,6 \text{ МэВ}$, которая имеет наибольшее сечение. Запасы дейтерия в природе практически неисчерпаемы, а радиоактивный тритий с периодом полураспада 12,4 года может быть получен в результате реакции $n + {}^6\text{Li} = {}^4\text{He} + T + 4,8 \text{ МэВ}$. Запасы лития также велики, что позволяет ученым говорить о возможности решения энергетической проблемы человечества с помощью управляемого термоядерного синтеза (УТС).

При каких условиях можно осуществить эффективное термоядерное горение? Синтезу ядер препятствует кулоновское отталкивание. Для его преодоления дейтерий-тритиевую плазму необходимо нагреть примерно до 100 млн. град (10 кэВ). При этом обеспечить ее достаточную концентрацию n и удерживать при этой температуре и плотности в течение промежутка времени τ , необходимого для "выгорания" значительной части термоядерного горючего. Оценки показывают, что для этого при температуре плазмы $T \approx 10 \text{ кэВ}$ произведение концентрации частиц на время удержания должно удовлетворять неравенству $n\tau \geq 10^{14} \text{ с/см}^3$, известному как критерий Лоусона. При этом выделившаяся в результате термоядерных реакций энергия превысит энергию, затраченную на нагрев.

В земных условиях эффективное горение термоядерного горючего в Советском Союзе было впервые продемонстрировано в 1953 г. при успешном испытании термоядерной бомбы. Практически в это же время (в 1950 г.) А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом была выдвинута идея удержания и термоизоляции плазмы с помощью магнитных полей, после чего стали интенсивно развиваться исследования по получению управляемой термоядерной реакции на основе схем с магнитным удержанием плазмы.

Изобретение лазера и его уникальные свойства, позволяющие концентрировать энергию в малых объемах, привели к возникновению нового направления в проблеме УТС – лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). По воспоминаниям [1] коллег А. Д. Сахарова, им в 1960 г. предло-

жена концептуальная схема облучения термоядерной мишени на небольшом семинаре во ВНИИЭФ. Согласно этой схеме, лазерный источник помещался в один из фокусов эллиптического зеркала, а во втором располагалась оболочка, заполненная DT-топливом. Данная схема не была опубликована. Первой опубликованной работой по использованию лазера для зажигания термоядерного горючего явилась работа Н. Г. Басова и О. Н. Крохина [2]. Несколько позже была опубликована работа американских ученых [3], посвященная сжатию и нагреву термоядерного горючего с помощью лазера.

Идея осуществления управляемого термоядерного горения с помощью лазера привели к бурному развитию работ по созданию мощных моноимпульсных лазерных установок с длительностью порядка одной миллиардной секунды и менее. На этих установках проводились и проводятся исследования по физике высокотемпературной плазмы, конечной целью которых является определение конструкции мишени и параметров лазера, необходимых для осуществления зажигания термоядерного горючего. За более чем 40-летний период работ по ЛТС энергия лазерного импульса возросла от единиц джоулей до сотен килоджоулей.

В 60–70-е годы прошлого века активные работы по созданию мощных лазерных установок и исследований физики высокотемпературной плазмы в нашей стране проводились в ФИАН. В этом институте в 1971 г. был запущен 9-канальный неодимовый лазер "Кальмар" [4]. Успешные исследования по нагреву и сжатию сферических мишеней, а также физике взаимодействия мощного лазерного излучения с плазмой позволили построить первые физические модели сжатия лазерных мишеней. С другой стороны они способствовали созданию целого ряда установок в различных институтах СССР. В конце 70-х начале 80-х годов были начаты исследования на установке "Мишень" [5] (Nd-лазер с одним пучком) в филиале ИАЭ г. Троицк (ныне ТРИНИТИ), на установке "Прогресс" [6] (Nd-лазер, 6 каналов) в филиале ГОИ в г. Сосновый Бор (ныне НИИКИ ОЭП), на установке "Дельфин" [7] в ФИАН. Энергия лазерного импульса на этих установках была в диапазоне от одного до нескольких килоджоулей. Примерно в это же время были запущены установки в двух ядерных центрах нашей страны: ВНИИЭФ и ВНИИТФ. Это были йодный лазер "Искра-4" [8] и неодимовая лазерная установка "Сокол" [9].

Одной из наиболее успешных программ по созданию лазерных систем и исследованию физики работы термоядерных мишеней является программа, реализованная в ядерном центре США – Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (ЛЛНЛ). В 1985 г. там была запущена установка на Nd стекле NOVA [10] с энергией импульса 100 кДж при длительности (1–3) нс.

Наиболее крупными в мире установками, на которых проводятся исследования по проблемам ЛТС, в настоящее время являются следующие:

- Nd-лазер OMEGA [11] (Рочестерская национальная лаборатория, США) с энергией лазерного импульса 60 кДж при его длительности порядка 1 нс;
- Nd-лазер GEKKO XII [12] (Осакий институт лазерных исследований, Япония) с энергией 30 кДж при длительности импульса 1 нс;
- йодный лазер ИСКРА-5 [13] (РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров) с энергией лазерного импульса 30 кДж при длительности 0,3 нс.

Проведенные на мощных лазерных установках исследования, основные результаты которых будут обсуждены ниже, позволили развить понимание физики явлений, протекающих при сжатии лазерных термоядерных мишеней. Были созданы физические модели различных процессов, определяющих динамику сжатия, созданы на основе этих моделей расчетные методики радиационной газовой динамики, с помощью которых проводится анализ экспериментов, и разрабатываются конструкции мишеней для зажигания. Развитие лазерных технологий, а также полученные принципиальные результаты, демонстрирующие возможность "зажигания" мишени с применением мощных лазеров, позволили приступить к созданию лазерных установок нового поколения с мегаджоульным уровнем энергии, на которых исследователи вплотную приблизятся к порогу зажигания лазерной термоядерной мишени. В США и Франции создаются установки NIF [14] и LMJ [15], а в России – установка "Искра-6" [16].

Зажигание термоядерной мишени

В настоящее время рассматриваются две основные схемы сжатия термоядерных мишеней: прямого и непрямого облучения. В обеих схемах (рис. 1) на внешнюю поверхность сферической оболочки, заполненной DT-топливом, падает поток энергии. Как только внешний слой оболочки начинает разгружаться наружу, на поверхности неиспаренной части (сферического поршня) возникает абляционное давление. Под действием этого давления сферический поршень сжимает термоядерное горючее до требуемой плотности и нагревает его до необходимой температуры. В схеме прямого облучения (рис. 1,а) испарение оболочки осуществляется при непосредственном воздействии лазерного излучения на мишень. В непрямом способе сжатие термоядерного горючего осуществляется под действием рентгеновского излучения, возникающего в результате нагрева лазерным излучением внутренней поверхности специальной капсулы, окружающей термоядерную мишень (рис. 1,б).

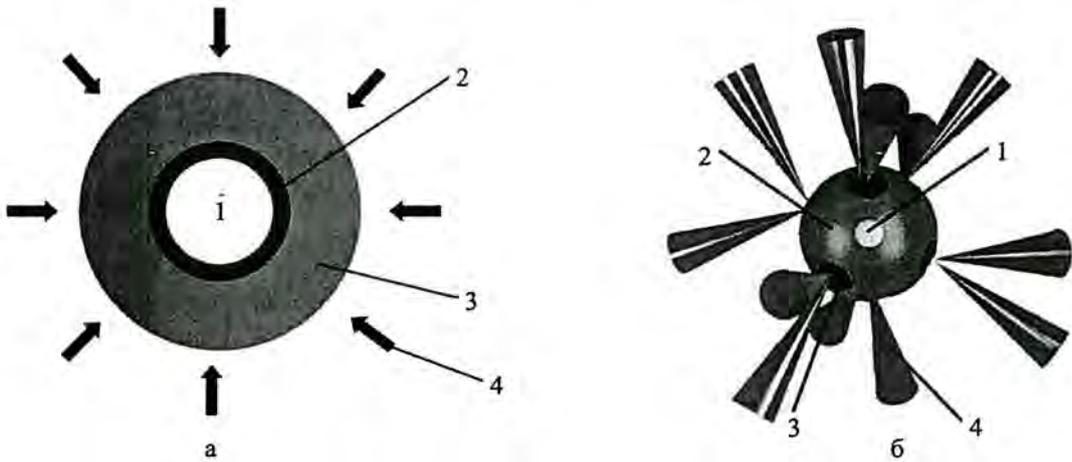


Рис. 1. Лазерные термоядерные мишени прямого (а) и непрямого (б) облучения: а) 1 – сжатое DT-топливо; 2 – неиспаренная оболочка; 3 – плазменная корона; 4 – лазерные пучки; б) 1 – сферическая оболочка, заполненная DT-топливом; 2 – внешняя оболочка, покрытая изнутри слоем вещества с большим Z; 3 – отверстия для ввода лазерного излучения; 4 – лазерные пучки

Фактически в таких мишенях реализуется так называемый принцип инерциального удержания плазмы, когда сжатое до плотности ρ и нагретое до температуры T топливо существует в течение некоторого промежутка времени, необходимого для разлета (разгрузки) сжатого ядра. Следовательно, в течение этого времени необходимо реализовать условия для зажигания мишени. Время разлета можно определить следующим соотношением $\tau \approx R/c_s$, где R – радиус сжатого ядра; c_s – скорость звука, определяющая характерную скорость разгрузки плазмы. В этом случае условие зажигания (критерий Лоусона) преобразуется в используемое специалистами по инерциальному синтезу соотношение $\rho R \geq 0,3 \text{ г/см}^2$.

Какой же минимальный уровень лазерной энергии E_L требуется для реализации этого условия? Рассмотрим этот вопрос на примере мишени прямого облучения. Очевидно, что величина E_L будет тем меньше, чем выше будут эффективность поглощения излучения в мишени η_1 и гидродинамический КПД η_2 , характеризующий эффективность передачи поглощенной энергии в кинетическую энергию оболочки, а также чем больше доля энергии оболочки η_3 , которую уда-

ется передать во внутреннюю энергию термоядерного горючего E_{DT} . Для определения требуемой энергии лазерного импульса удобно выписать соотношение $E_L \cong \frac{E_{DT}}{\eta_1 \eta_2 \eta_3}$.

Минимальная энергия термоядерного горючего, которая достаточна для зажигания, определяется выражением $E_{DT} \cong 4,8 \cdot 10^2 \cdot T \frac{(\rho R)^3}{\rho^2}$ МДж, где температура T измеряется в кэВ, ρR в г/см²,

а плотность ρ в г/см³. Отметим, что величина E_{DT} обратно пропорциональна квадрату плотности сжатого горючего. Следовательно, чем выше степень сжатия, тем меньше требуемая для зажигания энергия. При уровне плотности сжатой термоядерной смеси $\rho = 100$ г/см³, которая оценивается на сегодняшний день как предельно достижимая, получим минимальную энергию на уровне $E_{DT} \approx 13$ кДж. При этом минимальная масса DT-топлива, которую можно зажечь, составляет 1 мг.

Задача определения значений параметров η_1, η_2, η_3 является достаточно сложной. Она требует учета достаточно большого количества физических явлений, экспериментального и расчетного моделирования. Анализ всей имеющейся совокупности данных позволяет провести оптимистические оценки этих величин: $\eta_1 \approx 0,8$, $\eta_2 \approx 0,1$, $\eta_3 \approx 0,3$. Соответственно оптимистической оценкой минимальной требуемой для зажигания энергии лазерного импульса является $E_L \geq 500$ кДж.

Проведенное рассмотрение дает только приблизительное представление о конструкции термоядерной мишени и о требованиях, которые предъявляются к лазеру. Более детальную информацию можно получить на основании газодинамических расчетов, которые учитывают всю совокупность физических процессов, определяющих динамику сжатия мишени. Рассмотрим для примера результаты одномерных расчетов по программе радиационной газовой динамики СНДП [17, 18]. Физические модели, используемые в данной программе, апробированы на экспериментах, проведенных в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установках "Искра-4" и "Искра-5".

Расчетная оптимизация конструкции мишени прямого облучения показывает, что лазерным импульсом с энергией 500 кДж удастся зажечь термоядерную мишень (рис. 2), которая представляет собой пластиковую сферическую оболочку диаметром примерно 1,5 мм и толщиной стенки 30 мкм. На внутреннюю поверхность оболочки заморожен слой DT-льда толщиной около 25 мкм. Для предотвращения испарения слоя DT-льда необходимо содержать такую мишень при очень низких "криогенных" температурах, поэтому данная конструкция мишени получила название криогенной мишени.

Для обеспечения энергетически выгодного изэнтропического режима сжатия форма лазерного импульса должна быть специальным образом профилирована (рис. 2,б), а его длительность согласована с радиусом и массой оболочки таким образом, чтобы момент максимального сжатия термоядерного топлива совпадал с моментом окончания лазерного воздействия. Расчеты показывают, что при выбранных параметрах мишени и лазерного импульса энергия, выделившаяся в результате термоядерных реакций, почти в 10 раз превышает лазерную энергию. При этом выход термоядерных нейтронов составляет $2 \cdot 10^{18}$ нейтронов за импульс, объемное сжатие термоядерного горючего — $\delta \approx 10^4$, а плотность DT-смеси на момент максимального сжатия равна примерно 100 г/см³.

Существует целый ряд физических явлений, которые необходимо преодолеть для того, чтобы в реальных условиях получить картину сжатия мишени, близкую к рассмотренной выше идеальной картине. Главными из них являются процессы, нарушающие сферическую симметрию сжатия. Неоднородность облучения мишени, отличие от сферической симметрии оболочки и разнотолщинность слоя DT-льда приводят к нарушению одномерности сжатия и соответственно

к увеличению требуемой для зажигания энергии. Условно эти факторы могут быть разделены на две группы, отличающиеся по пространственному масштабу. К крупномасштабным неоднородностям относятся возмущения с длиной волны $(0,1-1) R_0$, где R_0 – начальный радиус мишени. К мелкомасштабным неоднородностям соответственно относятся возмущения с длиной волны меньше $0,1 R_0$. Такое разделение не случайно. Оно связано с различной физикой их влияния на динамику сжатия мишеней.

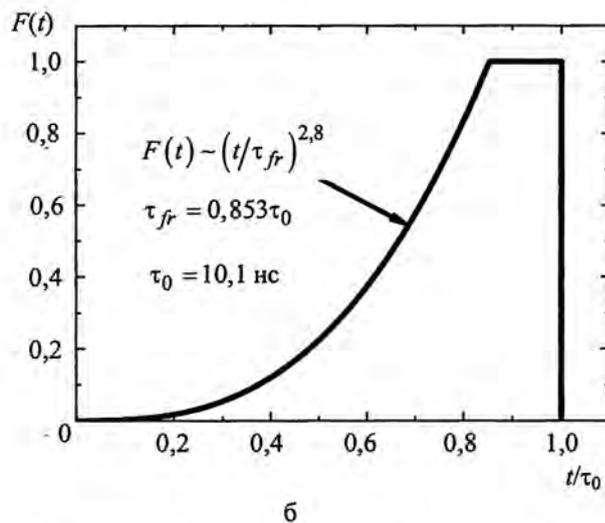
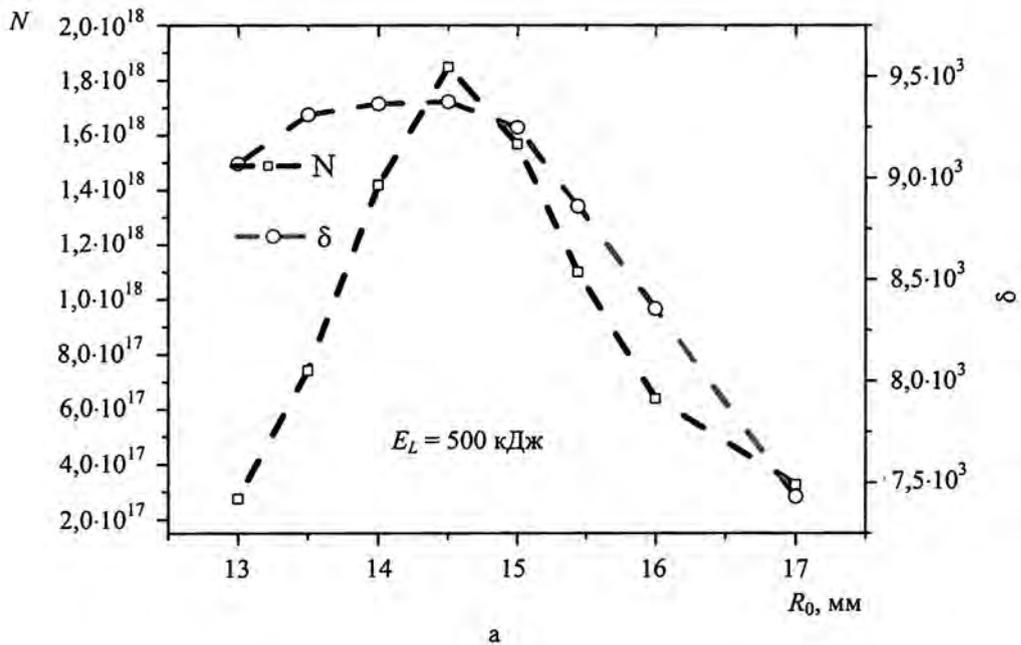


Рис. 2. Исследования сжатия мишеней прямого облучения (одномерные расчеты): а – зависимость нейтронного выхода N и максимальной степени сжатия δ от внешнего радиуса оболочки R_0 (одномерные расчеты по программе СНДП); б – временная форма профилированного импульса

Рассмотрим вначале влияние крупномасштабных неоднородностей. Расчетные исследования по данной проблеме проводятся во многих лабораториях в нашей стране и за рубежом (см., например, [19–23]). Проведем анализ этого влияния на основе двумерных расчетов по программе МИМОЗА НД [24] для термоядерной мишени, которая зажигается согласно одномерным расчетам в условиях, рассмотренных выше. Вариация интенсивности лазерного излучения по поверхности мишени можно задать в виде: $I = I_0 [1 + a_l P_l(\cos \theta)]$, где I_0 – средняя по поверхности мишени интенсивность; $P_l(\cos \theta)$ – полином Лежандра; a_l – амплитуда возмущения. Наиболее показательным параметром, характеризующим влияния неоднородности на зажигание мишени, является отношение выделившейся термоядерной энергии в результате протекания реакции термоядерного синтеза, полученное в двумерных расчетах, к аналогичному значению одномерного расчета. Зависимость этого параметра от амплитуды возмущения a_l для двух гармоник $l = 2$ и $l = 10$ показывает (рис. 3), что близкие величины возмущений для обеих гармоник приводят примерно к равному падению величины выделившейся энергии. Причем снижение энерговыделения в 2 раза происходит при амплитуде неоднородности облучения примерно 5 %. А при уровне неоднородности 9 % нейтронный выход практически отсутствует. Эти исследования позволяют сделать вывод, что при степени объемного сжатия на уровне 10000 крупномасштабные неоднородности с амплитудой порядка 3 % не сказываются на динамике сжатия и горения термоядерного горючего.

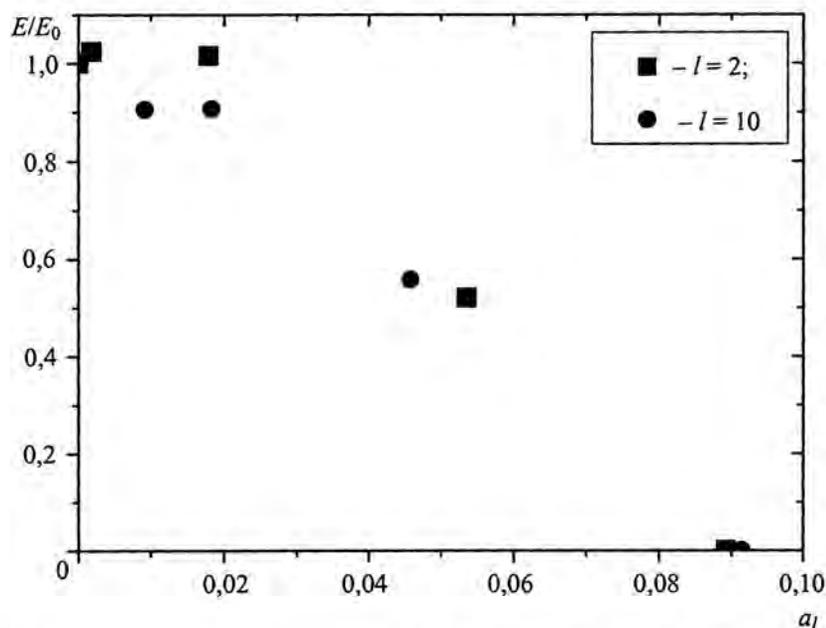


Рис. 3. Снижение нормированного на одномерный расчет энерговыделения термоядерной мишени в зависимости от амплитуды крупномасштабных возмущений: ■ – $l = 2$; ● – $l = 10$

Наличие мелкомасштабных неоднородностей приводит к эффективному развитию газодинамических неустойчивостей. В [19] наиболее полно рассмотрены все основные типы неустойчивостей, которые могут сопровождать сжатие термоядерной мишени при лазерном обжатии. Рассмотрим для примера физическую картину, которая реализуется на стадии торможения оболочки DT-плазмой. Фактически на этом этапе неспаренная оболочка с плотностью выше твердотельной тормозится малоплотной DT-плазмой. То есть, реализуется хорошо известная картина пере-

мешивания (развития рэлей-тейлоровской неустойчивости), когда тяжелая жидкость налита на поверхность легкой. В этом случае можно ожидать перемешивания материала оболочки и ДТ-топлива, что нарушает режим зажигания последнего. Причем именно мелкомасштабные неоднородности стимулируют развитие неустойчивостей, так как наиболее опасными являются возмущения с пространственным масштабом порядка толщины оболочки.

К сожалению, существующий уровень развития современных компьютеров не позволяет осуществить прямое моделирование влияния неустойчивостей и турбулентного перемешивания на динамику сжатия мишеней и их зажигание из-за сильного отличия пространственных и временных масштабов этих процессов. Оценки показывают, что требуются вычислительные мощности с быстродействием больше 100 Тфлоп. И хотя ведутся интенсивные экспериментальные (см., например, [25, 26]) и теоретические [27–29] исследования, отсутствует количественный ответ на вопрос о том, какого повышения уровня лазерной энергии потребует решение проблемы с неустойчивостями.

Метод прямого облучения (МПО) является более экономичным с точки зрения энергии, требуемой для зажигания. Однако в этом методе значительно труднее решить проблему симметричного облучения поверхности мишени из-за высокой когерентности лазерного излучения, высоких требований к качеству каждого лазерного пучка и системе сведения всех пучков на мишени.

В мишенях непрямого облучения, которые в литературе получили название рентгеновских, лазерное излучение преобразуется в рентгеновское внутри полости бокса-конвертора. Основным достоинством этих мишеней является возможность однородного облучения термоядерной мишени путем заполнения полости равновесным и почти изотропным рентгеновским излучением. В то же время из-за наличия промежуточного этапа – конверсии лазерной энергии в рентгеновскую энергию, данный подход, хотя и является более надежным, требует для зажигания, по различным оценкам, в 3–4 раза большей энергии.

Еще одно физическое явление, которое имеет существенное значение при формулировке требований к лазерной установке на зажигание, связано с особенностью взаимодействия мощного лазерного излучения с плазмой. При миллиметровых размерах мишени, энергии лазерного импульса порядка 500 кДж и длительности импульса несколько наносекунд интенсивность I лазерного излучения на поверхности мишени превышает 10^{15} Вт/см². В этих условиях процесс поглощения излучения в плазме носит нелинейный характер. Причем параметром нелинейности является параметр $I\lambda^2$, где λ – длина волны лазерного излучения. При $I\lambda^2 \leq 10^{14} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \cdot \text{мкм}^2$ энергия электромагнитных волн переходит в тепловую энергию свободных электронов, т. е. происходит их тепловой нагрев. В случае, когда параметр $I\lambda^2 > 10^{14} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} \cdot \text{мкм}^2$, скорость колебания

электронов в поле электромагнитной волны сравнима с их тепловой скоростью. При этом возможна эффективная трансформация энергии лазерного излучения в энергию плазменных колебаний. Затухание последних сопровождается генерацией "горячих" электронов с эффективной температурой, более чем на порядок превышающей тепловую температуру плазмы.

Наличие "горячих" электронов оказывает негативное влияние на динамику сжатия мишеней. Во-первых, высокоэнергетичные электроны осуществляют предпрогрев ДТ-топлива, что препятствует достижению высоких сжатий. Во-вторых, эти электроны рождают "быстрые" ионы, которые уносят из мишени часть поглощенной лазерной энергии и тем самым снижают гидродинамический КПД мишени. Поэтому для повышения эффективности энерговыклада длина волны лазерного излучения должна быть менее 0,5 мкм.

Проведенное рассмотрение позволяет сформулировать требования к лазерной установке, на которой можно вплотную приблизиться к порогу зажигания:

- энергия лазерного излучения на мишени ≥ 500 кДж;
- длительность лазерного импульса $\tau \cong (3 - 5)$ нс;
- форма лазерного импульса профилированная;
- длина волны лазерного излучения $\lambda \leq 500$ нм;
- однородность облучения мишени $\delta I/I \leq 1-2$ %.

К настоящему времени на мощных лазерных установках в национальных лабораториях различных стран мира получены ключевые результаты, демонстрирующие возможность зажигания мишени с применением мощных лазеров. Активные исследования физики работы мишеней прямого облучения проводятся на установках OMEGA (США) [11] и GEKKO XII (Япония) [12]. В экспериментах получен нейтронный выход $10^{12} - 10^{14}$ нейтронов за импульс [30, 31]. Продемонстрирована возможность сжатия DT-газа в $10^3 - 10^4$ раз. Проведены успешные эксперименты по исследованию динамики сжатия криогенных мишеней.

Широкий круг исследований физики работы мишеней непрямого облучения выполнен на установке NOVA (США) [32]. В этих экспериментах использовались мишени, в которых капсула с DT-газом помещалась внутрь цилиндрического бокса-конвертора. Проведенные исследования позволили продемонстрировать возможность достижения высокой однородности (≤ 8 %) облучения центральной мишени рентгеновским излучением и получить плотность сжатой DT-смеси на уровне 30 г/см^3 .

Продолжаются исследования различных аспектов проблемы ЛТС на установках VULCAN (Великобритания) [33], SG-II [34] (Китай) и др.

В 1989 г. в РФЯЦ-ВНИИЭФ запущена самая мощная в Европе установка "Искра-5" [13], на которой проводятся исследования физики работы сферических мишеней непрямого облучения. В экспериментах на этой установке при реализации различных исследовательских программ принимали участие специалисты из различных институтов России: ФИАН, РФЯЦ-ВНИИТФ, ИТЭФ, НИИТ и др. В 1996 г. РФЯЦ-ВНИИЭФ приступил к созданию установки мегаджоульного уровня – "Искра-6" [16]. Во многом благодаря усилиям кооперации российских институтов, в которую входят РФЯЦ-ВНИИЭФ, НИИЭФА, ГОИ, ИПФАН, ФИРАН, НИИКИ ОЭП, ТРИНИТИ и др., удалось в короткие сроки в 2001 г. запустить модуль этой установки – установку "Луч" [35, 36].

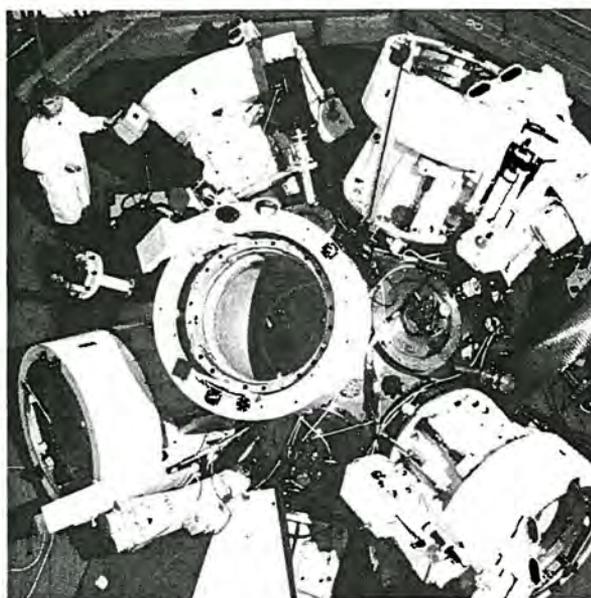
Рассмотрим более подробно основные результаты работ, которые были проведены в РФЯЦ-ВНИИЭФ по проблеме ЛТС за последние 20 лет. Отметим, что работы по созданию в РФЯЦ-ВНИИЭФ моноимпульсных лазерных установок и проведению на них исследований по проблеме ЛТС были начаты и проводились под руководством Ю. Б. Харитона, С. Б. Кормера, Г. А. Кириллова.

Исследования физики горячей плотной плазмы на установке "Искра-5"

На базе лазерной установки "Искра-5" создан экспериментальный комплекс для исследований физики работы мишеней непрямого облучения и моделирования отдельных физических процессов, протекающих в горячей плотной плазме. Установка представляет из себя двенадцатиканальный йодный лазер с суммарной энергией лазерного импульса 30 кДж при его длительности 0,3 нс на длине волны 1,315 мкм. Установка расположена в четырехэтажном здании (рис. 4,а), построенном в виде "креста" продольным размером каждого крыла примерно 110×135 м. Лазерные мишени помещаются в центр сферической камеры взаимодействия (рис. 4,б) диаметром 2 м. Двенадцать лазерных пучков, расположенных в пространстве симметрично относительно мишени, фокусируются на нее с точностью 10–50 мкм.



а



б

Рис. 4. Установка "Искра-5": а – здание установки; б – камера взаимодействия

Для решения задачи диагностики параметров плазмы и динамики сжатия мишени установка оснащена комплексом аппаратуры, которая позволяет исследовать характеристики рентгеновского излучения плазмы с временным (≤ 10 пс), пространственным (≤ 10 мкм) и спектральным разрешением, изучать потоки заряженных частиц, измерять количество нейтронов, регистрировать температуру сжатой термоядерной смеси. Для анализа результатов экспериментов разработаны физические модели различных процессов, определяющих динамику сжатия мишени, которые внедрены в одномерные и двумерные программы радиационной газовой динамики.

Исследование работы рентгеновской мишени в однородном рентгеновском поле

В [37, 38] специалистами РФЯЦ-ВНИИЭФ была предложена конструкция мишени непрямого облучения (см. рис. 1,б). Основным ее отличием от мишеней, которые исследовались на установке NOVA, является то, что вместо цилиндрического бокса-конвертора используется сферический бокс с 6 отверстиями для ввода лазерного излучения, расположенными в сферически-симметричной геометрии. В мишенях, которые использовались в экспериментах на установке "Искра-5", диаметр бокса составлял 2 мм. Его внутренняя поверхность была покрыта тонким слоем золота толщиной 1 мкм. Характерный диаметр центральной капсулы составлял примерно 300 мкм.

Главное преимущество выбранной конструкции мишени является высокая однородность облучения центральной капсулы рентгеновским излучением. При отношении радиуса бокса к радиусу центральной капсулы более 5 неоднородность рентгеновского потока не превышает 3 %.

Основными задачами, которые ставились в экспериментах с такими мишенями, являлись исследования характеристик рентгеновского поля, его спектра, эффективной температуры, степени симметрии. Кроме того, для понимания процессов, происходящих в мишенях, регистрировались такие характеристики как скорость полета оболочки, степень сжатия DT-газа и его температура.

Проведенные исследования подтвердили, что выбранная геометрия облучения обеспечивает высокую степень симметрии рентгеновского поля на поверхности центральной капсулы. Фотография рентгеновского свечения центральной мишени, полученная с помощью камеры-обскуры (рис. 5), показывает высокую степень симметрии сжатой области. Регистрация спектра рентгеновского излучения, генерируемого стенками бокса, показала, что рентгеновский поток, облучающий поверхность стеклянной капсулы, соответствует эффективной температуре 160–170 эВ. Измерения времени схождения оболочки позволили получить в ряде экспериментов среднюю скорость ее полета около $3 \cdot 10^7$ см/с. Максимальный нейтронный выход составил около 10^{10} нейтронов за импульс, а температура ионной компоненты DT ~ 3 кэВ.

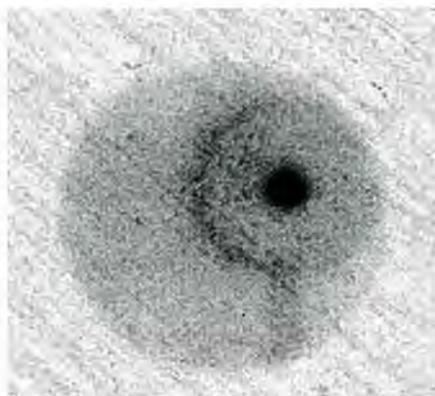


Рис. 5. Обскурограмма центральной мишени, полученная в типичном эксперименте на установке "Искра-5" с мишенями непрямого облучения, которая демонстрирует высокую степень симметрии сжатой области

Анализ, который проводился на основе сравнения результатов экспериментов и расчетов по программе СНДП, показал удовлетворительное согласие для всей совокупности регистрируемых параметров.

Исследование влияния асимметрии на сжатие и нагрев капсул, содержащих DT-газ

Хорошая и стабильная симметрия рентгеновского излучения в сферическом боксе (при отношении диаметров бокса и мишени более 5) предоставила возможность провести исследования [39] влияния крупномасштабной контролируемой асимметрии на динамику сжатия мишени и нейтронный выход. Существует несколько вариантов создания контролируемой асимметрии. Мы выбрали метод, базирующийся на введении дополнительного отверстия в боксе и сдвиге сферической капсулы в направлении этого дополнительного отверстия (рис. 6,а).

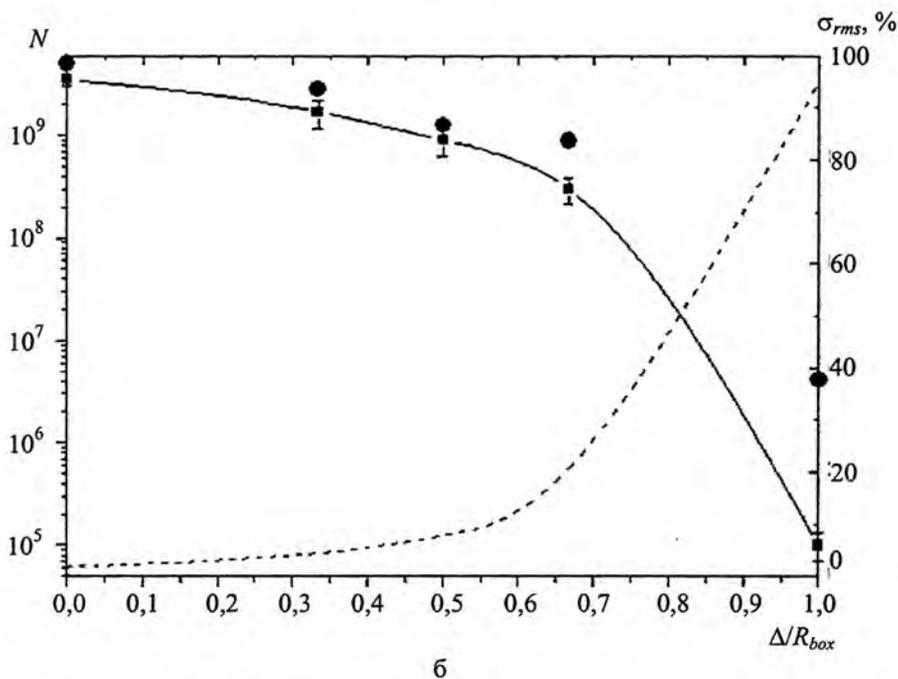
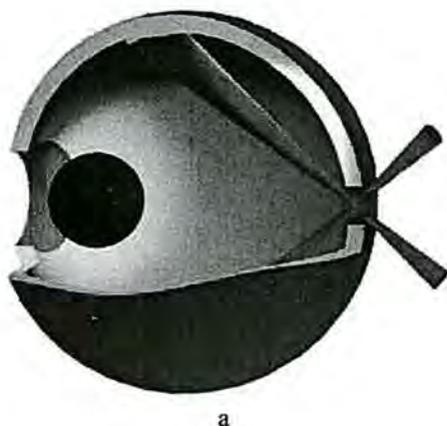


Рис. 6. Конструкция мишени для исследования влияния асимметрии рентгеновского поля на динамику сжатия капсулы с DT топливом (а) и зависимость нейтронного выхода и степени неоднородности рентгеновского поля на ее поверхности σ_{rms} от величины сдвига мишени относительно центра бокса (б):

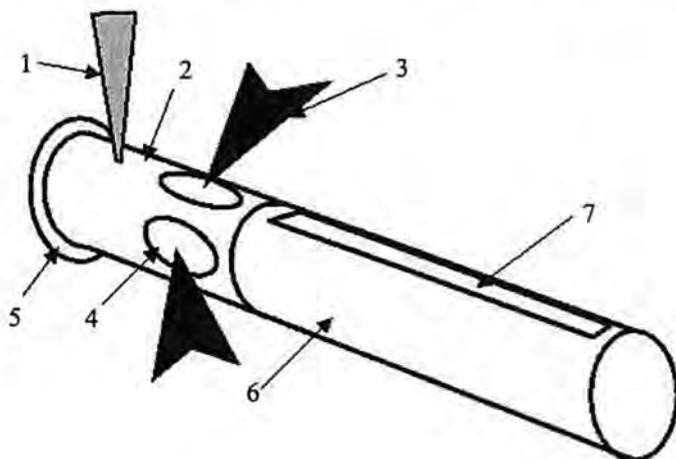
----- σ_{rms} ; —■— эксперимент; ●— расчет

Проведенное сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами газодинамических расчетов сжатия центральных капсул по программе МИМОЗА-НД позволяет констатировать качественное и количественное согласие между экспериментальными и расчетными данными в широком диапазоне изменения асимметрии рентгеновского поля. Наблюдается удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных значений нейтронного выхода во всем исследованном диапазоне сдвигов (рис. 6,б).

Эти результаты 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 DT-газом. Это свидетельствует, во-первых, о том, что в комплексе МИМОЗА-НД адекватно учтены основные физические процессы, ответственные за динамику мишеней и генерацию нейтронов. И, во-вторых, о том, что расчетная схема комплекса МИМОЗА обеспечивает приемлемую точность расчетов столь чувствительного физического параметра, каким является нейтронный выход. Результаты анализа показывают, что эксперименты с мишенями, в начальную геометрию которых внесена контролируемая асимметрия, или сжимающее их рентгеновское излучение является несимметричным, могут служить удобным инструментом для исследования точности двумерных газодинамических расчетных методик.

Исследования переноса РИ по цилиндрическим каналам

На рис. 7,а приведена типичная конструкция мишеней для исследования распространения рентгеновского излучения по цилиндрическим каналам, с которыми проводились эксперименты на лазерной установке "Искра-5" [40]. Лазерное излучение (четыре луча) вводится через отверстия диаметром 0,3 мм каждое в левый отсек мишени (так называемый "Иллюминатор") длиной 1 мм и диаметром 1 мм. Выходное окно "Иллюминатора" закрывается тонкопленочным СН-фильтром



а

Рис. 7. Конструкция мишени для исследования распространения рентгеновского излучения по цилиндрическим каналам (а) и сопоставление экспериментальных данных и расчетов относительного снижения интегрального по времени и спектру потока рентгеновского излучения вдоль канала для различных материалов покрытия внутренней поверхности канала (б): 1 – подвеска; 2 – кожух "Иллюминатора"; 3 – лазерные пучки; 4 – отверстия для ввода лазерного излучения; 5 – доньшко "Иллюминатора"; 6 – цилиндрический канал; 7 – диагностическая щель (см. также с. 90)

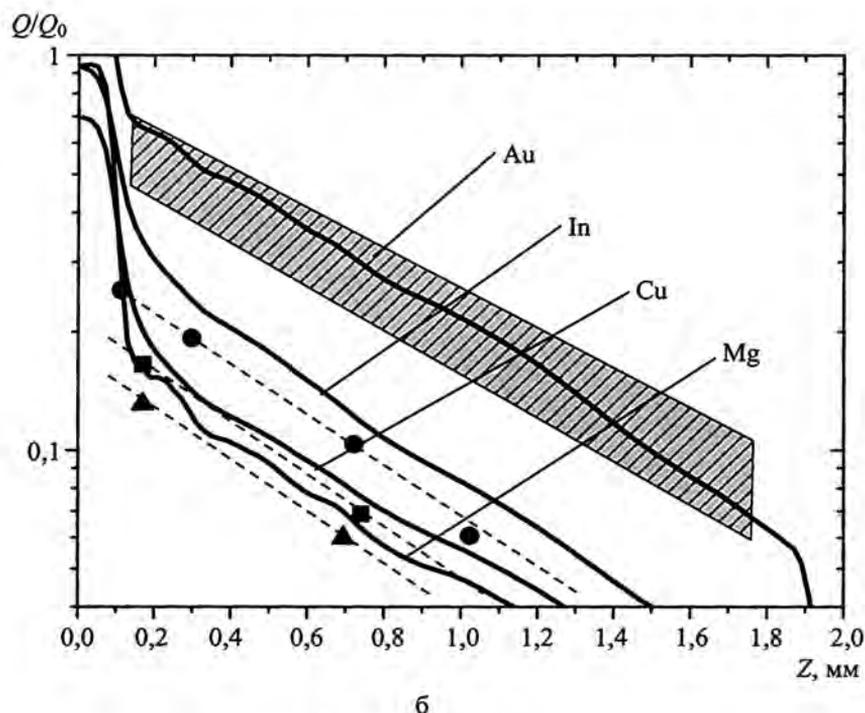


Рис. 7. Окончание

толщиной 0,5 мкм, на внутреннюю поверхность которого наносится слой золота толщиной 0,1 мкм. В условиях установки "Искра-5" в "Иллюминатор" можно ввести до 3 кДж лазерной энергии в 4 пучках при длительности импульса $\sim 0,35$ нс на первой гармонике йодного лазера ($\lambda = 1,315$ мкм). При этом "эффективная" температура РИ достигает $T_{эф} \approx (150 \pm 15)$ эВ. Возникающее рентгеновское излучение поступает в правый отсек мишени длиной 2 мм. В экспериментах исследуются параметры поля рентгеновского излучения в этом отсеке при вариации его параметров.

Один из основных результатов экспериментов – регистрация распределения плотности потока РИ из диагностической щели. Полученные экспериментальные результаты сопоставлялись с соответствующими расчетными данными, получаемыми в двумерных и трехмерных расчетах в одно- и многогрупповых приближениях. На рис. 7,б представлены экспериментальные и расчетные потоки РИ вдоль каналов, выполненных из различных материалов, которые свидетельствуют об удовлетворительном согласии.

Исследования физики работы рентгеновского лазера

На мощной лазерной установке "Искра-5" впервые в России продемонстрирована работа лабораторного рентгеновского лазера (ЛРЛ) на переходах неоноподобных ионов. В качестве активной среды использована германиевая плазма, полученная при облучении плоской мишени сфокусированным в строчку излучением интенсивностью $8 \cdot 10^{12}$ Вт/см².

Зарегистрированная энергия лабораторного рентгеновского лазера при длине излучающего слоя 1,4 см составляет примерно 5 мкДж. Длительность импульса зарегистрирована на уровне 100 пс, а коэффициент усиления равен 7 см^{-1} .

Перевод установки "Искра-5" на вторую гармонику

В конце 2003 г. осуществлен перевод установки "Искра-5" на работу при длине волны ЛИ $\lambda \approx 0,66$ мкм (вторая гармоника йодного лазера). Средняя энергия с канала в этих экспериментах составила (220 ± 40) Дж, длительность излучения $(0,55 \pm 0,10)$ нс, расходимость не превышала 0,1 мрад. Разновременность прихода лазерных импульсов на мишень не превышала ± 50 пс.

Проведены эксперименты по отработке источника РИ – "Иллюминатор". В экспериментах при суммарной энергии ЛИ до 1,4 кДж и длительности импульса 0,55 нс были зарегистрированы поток РИ и спектральное распределение, примерно соответствующие температуре $T_\gamma \approx 175$ эВ, что заметно выше параметров потока из иллюминатора, достигнутого при работе лазера на первой гармонике ($T_\gamma \approx 150$ эВ). Таким образом, экспериментально подтверждена возможность повышения параметров потока РИ в мишенях для опытов с различными типами мишеней.

Мощная неодимовая лазерная установка "Искра-6"

Эксперименты на установке ИСКРА-5 выявили ограниченность ее возможностей. В частности, при энергии лазерного излучения на уровне 30 кДж величина нейтронного выхода недостаточна для исследований всей совокупности режимов сжатия. Уровень температур квазиравновесного источника РИ 150–170 эВ не позволяет проводить исследования переноса РИ в мишенях непрямого облучения в полном объеме. В 1996 г. РФЯЦ-ВНИИЭФ выступил с предложением [16] о создании лазерной установки нового поколения с энергией, на порядок превышающей энергию установки "Искра-5". Данная установка, получившая название "Искра-6" (рис. 8), имеет следующие параметры:

Энергия лазерного излучения	300 кДж
Длина волны	351 нм
Форма импульса	профилированная
Длительность импульса	1–3 нс
Число каналов	128
Однородность облучения МПО	1–3 %

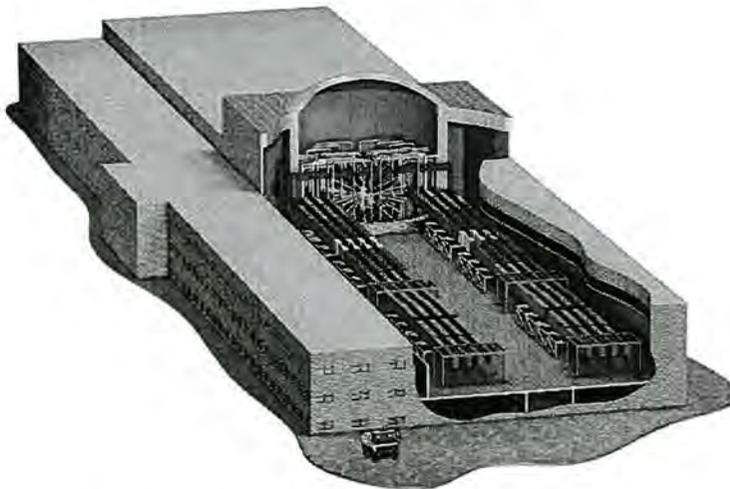


Рис. 8. Мощная лазерная установка "Искра-6"

Установка предназначена для проведения исследований по следующим направлениям:

- Перенос энергии рентгеновским излучением в замкнутых объемах.
- Спектроскопия горячей плотной плазмы.
- Спектральные коэффициенты поглощения рентгеновского излучения равновесной плазмой.
- Радиационная газовая динамика несимметричных течений.
- Уравнения состояния веществ в области давлений в 10 и 100 миллионов атмосфер.
- Исследования развития гидродинамических неустойчивостей и турбулентного перемешивания на контактных границах.
- Исследования динамики сжатия термоядерных мишеней вблизи порога зажигания.

Четырехканальная лазерная установка "Луч" – модуль установки "Искра-6"

При создании лазеров такого класса, как NIF, LMJ и "Искра-6", на первом этапе для проверки и отработки основных научно-технических решений, необходимо создавать менее масштабные установки, являющиеся прототипом (модулем) основной системы. Так, для установки NIF прототипом являлась установка BEAMLET [41], для установки LMJ – установка LIL [42]. Базовым модулем установки "Искра-6" является четырехканальная неодимовая установка "Луч" [35, 36], запущенная в РФЯЦ-ВНИИЭФ в 2001 г.

В основу указанных установок заложены принципиально новые научно-технические решения. Для повышения КПД лазера используется четырехпроходная схема усиления, в которой импульс четыре раза проходит через активные лазерные элементы (Nd пластины), тем самым повышается энергосъем запасенной в них энергии. Кроме того, лазерные каналы объединяются в блоки с единой системой накачки, основой которой составляют ксеноновые лампы-вспышки, что снижает потери запасенной в конденсаторной батарее энергии.

На установке "Луч" все четыре канала объединены в единый блок. Схема усиления включает в себя два силовых усилителя, в каждом из которых располагается 9 неодимовых пластин. В поперечном сечении лазерный пучок представляет собой квадрат с размером 20×20 см.

Ключевым вопросом при создании таких установок является проблема лучевой прочности оптических элементов и, в особенности, активных неодимовых пластин. Для реализации программы по созданию установки "Луч" (и соответственно установки "Искра-6") в С.-Петербургском институте НИТИОМ ВНЦ ГОИ была разработана принципиально новая технология варки неодимового стекла, которая позволила примерно в 4 раза повысить его лучевую прочность. Это достижение во многом определило возможность создания установки. Для проверки оптических элементов на лучевую прочность в РФЯЦ-ВНИИЭФ и НИИКИ ОЭП были созданы экспериментальные стенды с импульсом излучения, близким по форме и длительности к имеющемуся на установке "Луч", на которых были проведены соответствующие испытания. Результаты экспериментов показали, что в настоящее время лучевая прочность всех оптических элементов российского производства примерно в 1,5–3 раза превышает среднюю лучевую нагрузку. Такой запас по лучевой прочности позволяет говорить о возможности работы лазерных каналов с ресурсом в несколько тысяч выстрелов.

Другой проблемой мощных лазерных установок является качество оптических элементов, количество которых в каждом канале достигает нескольких десятков. Неидеальность оптических поверхностей, неоднородности оптических материалов могут приводить к существенным искажениям качества лазерных пучков (искажениям волнового фронта лазерного импульса). Для ослабления требований к качеству изготовления оптических элементов на установке "Луч" используется специальное деформируемое (адаптивное) зеркало, которое на основании измерений структуры волнового фронта на выходе установки компенсирует наблюдаемые искажения.

Установка "Луч" располагается в здании, которое имеет чистое помещение площадью $\sim 600 \text{ м}^2$ с уровнем чистоты 300 пылинок в кубическом футе, внутри которого имеются сверхчистые боксы для силовых усилителей и оптики с уровнем чистоты 3 пылинки в кубическом футе (рис. 9).



Рис. 9. Вид чистого помещения установки "Луч"

Необходимо также отметить, что система энергоснабжения (конденсаторная батарея) установки с энергоемкостью примерно 5 МДж построена на новой элементной базе. В частности, в качестве коммутаторов впервые были использованы полупроводниковые разрядники (рис. 10), технология создания которых разработана в С.-Петербургском физико-техническом институте им. Иоффе. Данные разрядники позволяют коммутировать токи до 300 кА.

После проведения оптимизации всех основных систем установки "Луч" были выполнены эксперименты по исследованию усиления импульса излучения в штатном режиме. Получена предельная выходная энергия $\approx 3,5 \text{ кДж}$ в канале при коэффициенте усиления слабого сигнала $g = 0,045 \text{ см}^{-1}$ [43, 44]. Анализ показал, что выходная энергия установки близка к расчетно-ожидаемой в условиях экспериментов.

Выполненные работы по созданию установки и исследования усиления лазерного излучения позволили подтвердить основные научно-технические решения, закладываемые в схему установки "Искра-6". В настоящее время завершен эскизный и технический проект установки и проводится подготовка производства ее основных элементов

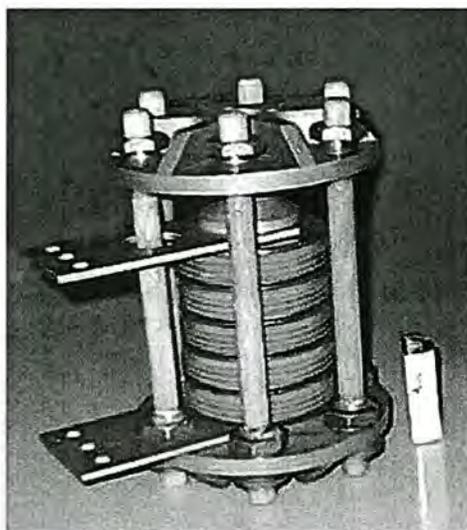


Рис. 10. Полупроводниковый коммутатор КРД-1

Петтаваттный лазерный комплекс

В последние годы наблюдается стремительный прогресс в разработке и создании твердотельных лазерных систем с импульсами фемтосекундной длительности ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$). В ведущих лазерных лабораториях созданы и проектируются установки субпеттаваттного и петтаваттного уровней мощности с длительностью лазерного импульса $\approx 100 \div 500 \text{ фс}$ (таблица). При таких уровнях мощности в сфокусированном пучке достижима интенсивность $10^{18} - 10^{22} \text{ Вт/см}^2$. При этих интенсивностях энергия колебания электронов в поле световой волны оказывается порядка энергии покоя. Такие релятивистские условия невозможно реализовать в лабораторных условиях другими способами.

Сверхмощные лазерные системы

Страна	Лаборатория	Параметры	Состояние
США	Center for Ultrafast Optical Sciences, University of Michigan. Установка HERCULES [45]	45 ТВт ($\approx 1,4 \text{ Дж}$, 30 фс)	Ведутся эксперименты при $I \approx 10^{21} \text{ Вт/см}^2$, достигнута интенсивность $I = 0,7 \cdot 10^{22} \text{ Вт/см}^2$
США	Lawrence Livermore National Laboratory Установка NIF-PW [45, 46]	4 ПВт (I этап) 100 ПВт (II этап)	В стадии разработки
Великобритания	Central Laser Facility, Rutherford Appleton Laboratory Установка VULCAN [45, 47]	1 ПВт (500 Дж, 500 фс)	Ведутся эксперименты при $I \sim 10^{20} \text{ Вт/см}^2$
	Astra Gemini Project [48]	1 ПВт ($\approx 30 \text{ Дж}$, 30 фс)	В стадии разработки
Япония	Advanced Photon Research Center, Japan Atomic Energy Research Institute [45, 49]	0,85 ПВт (28 Дж, 33 фс)	Ведутся эксперименты при $I \sim 10^{21} \text{ Вт/см}^2$
Япония	Institute of Laser Engineering, Osaka University Установка GEKKO-XII [50]	1 ПВт (500 Дж, 500 фс)	Ведутся эксперименты при $I \sim 10^{21} \text{ Вт/см}^2$
Франция	CEA/CESTA, UMR Centre Lasers Intenses et Applications, Universite de Bordeaux Установка LIL-PW [51]	7 ПВт (3,6 кДж; 500 фс)	В стадии разработки
Россия	ИПФ РАН + ВНИИЭФ [52]	130 ТВт (10 Дж, 70 фс)	Установка работает
Россия	ВНИИЭФ + ИПФ РАН	1 ПВт (100 Дж, 100 фс)	В стадии разработки, запуск в 2006 г.; эксперименты при $I \sim 10^{20} \text{ Вт/см}^2$ (2007 г.)

Появление нового инструмента привело к развитию целого ряда направлений исследований: генерация быстрых электронов и ионов, включая генерацию протонных пучков, генерация жесткого рентгеновского излучения, инициирование ядерных реакций и др. Различные научные

группы проводят теоретический анализ и экспериментальные исследования по определению возможности "быстрого" зажигания (fast ignition) термоядерной мишени на основе одновременного воздействия лазерного излучения наносекундной и фемтосекундной длительностей.

Запуск установки "Луч" открывает новые перспективы для проведения экспериментальных исследований по взаимодействию высокоинтенсивного лазерного излучения с веществом в фундаментальных и прикладных направлениях физики высоких плотностей энергии. РФЯЦ-ВНИИЭФ совместно с Институтом прикладной физики РАН (ИПФ РАН) было выдвинуто предложение и ведутся работы по созданию на базе канала установки "Луч" петаваттного лазерного комплекса. На этой установке предполагается проводить исследования свойств вещества, находящегося в полях с гигантской интенсивностью излучения $10^{21} - 10^{22}$ Вт/см².

Основу короткоимпульсных систем составляет задающий генератор, который создает лазерный импульс фемтосекундной длительности и энергией в несколько наноджоулей (1 нДж = 10^{-9} Дж). Усилить такой импульс до энергии, обеспечивающей мощность на уровне 1ПВт, невозможно. Это связано с невысокой лучевой прочностью оптических элементов усилительного тракта при сверхкороткой длительности лазерного импульса. Для решения этой проблемы импульс растягивают до наносекундной длительности с помощью дисперсионной оптической системы на основе дифракционной решетки, которая в литературе получила название стретчер. Далее импульс можно усиливать с помощью хорошо известных методов. После набора требуемой энергии импульс сжимают по времени с помощью другой оптической системы также на основе дифракционных решеток, которая в литературе получила название компрессор. Если не происходит искажения спектрального состава импульса излучения при усилении, то возможно сократить импульс до исходной длительности.

На практике, однако, усилительная система на Nd фосфатном стекле искажает (сужает) спектр лазерного импульса вследствие того, что ширина линии усиления ($\Delta\lambda_{yc} \approx 30$ нм) сравнима с шириной спектра усиливаемого импульса ($\Delta\lambda_{имп} \approx 20$ нм при $\tau_{имп} \approx 100$ фс). Это приводит к тому, что на выходе компрессора не удается получить длительность импульса излучения, близкую к исходной. Поэтому в ряде установок в качестве усиливающей среды применяются гораздо более широкополосные ($\Delta\lambda_{yc} \approx 400$ нм) широкоапертурные ($\varnothing 8$ см) кристаллы Ti:sapphire, что позволяет получать после компрессии импульсы длительностью ≈ 30 фс при петаваттном уровне мощности. В этом случае фактором, ограничивающим мощность лазерной системы, является размер кристаллов Ti:sapphire.

Таким образом, дальнейшее продвижение в направлении увеличения мощности на этом пути ограничено сравнительно узкой полосой усиления в неодимовом стекле, размерами кристаллов Ti:sapphire, размерами и лучевой прочностью дифракционных решеток компрессора.

В связи с этим активно обсуждаются и исследуются альтернативные возможности преодоления петаваттного барьера с использованием широкополосных усилительных систем. Одной из наиболее интересных с физической точки зрения и доступных для реализации в наших условиях является схема, основанная на использовании параметрических усилителей света вместо обычных лазерных [53].

При параметрическом усилении света входной сигнал на частоте $\nu_{сиг}$ подается на нелинейный кристалл вместе с интенсивной волной накачки $\nu_{нак}$, причем $\nu_{нак} > \nu_{сиг}$. Усиление волны с частотой $\nu_{сиг}$ происходит за счет ее нелинейного взаимодействия с волной накачки (энергия волны накачки перекачивается в энергию сигнальной волны). Эта перекачка, естественно, происходит с соблюдением законов сохранения энергии и импульса фотонов (трехволновое взаимодействие, генерируется холостая волна $h\nu_{хол} = h\nu_{нак} - h\nu_{сиг}$). Для параметрического усиления необхо-

дима нелинейная среда с нелинейностью второго порядка, поэтому в качестве среды для параметрического усилителя используется нелинейный анизотропный кристалл.

Запуск установки "Луч", лазерное излучение одного канала которой может быть использовано в качестве накачки параметрического усилителя, и наличие отработанной в ИПФ РАН технологии быстрого роста высококачественных анизотропных кристаллов DKDP позволили РФЯЦ-ВНИИЭФ и ИПФ РАН приступить к реализации на базе установки "Луч" проекта по созданию петаваттной лазерной системы.

Блок-схема такой системы приведена на рис. 11. В этой схеме наряду с традиционными для генерации сверхсильных полей принципами временного растяжения и компрессии усиленных импульсов используется принцип многокаскадного параметрического усиления на основе кристалла DKDP. Подобная идея, применительно к более низким уровням мощности излучения, была, по-видимому, впервые сформулирована советскими учеными около 15 лет назад [54]. Однако только сегодня, в связи с созданием фемтосекундных лазеров с длительностями импульсов до 10 фс и нелинейных кристаллов с апертурой до 40 см (рис. 12), возможно применить эту идею для получения рекордных мультипетаваттных уровней мощности [55].

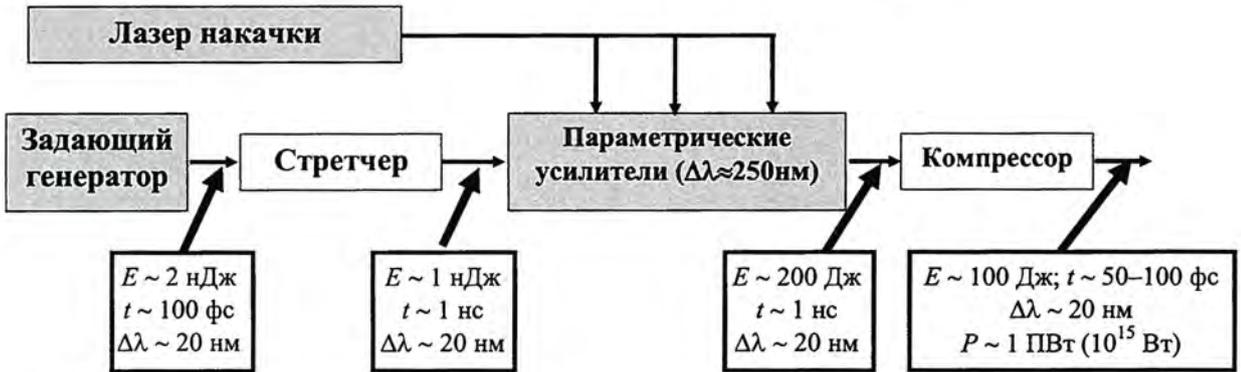


Рис. 11. Блок-схема фемтосекундного лазера, построенного по принципу параметрического усиления широкополосного chirпированного импульса

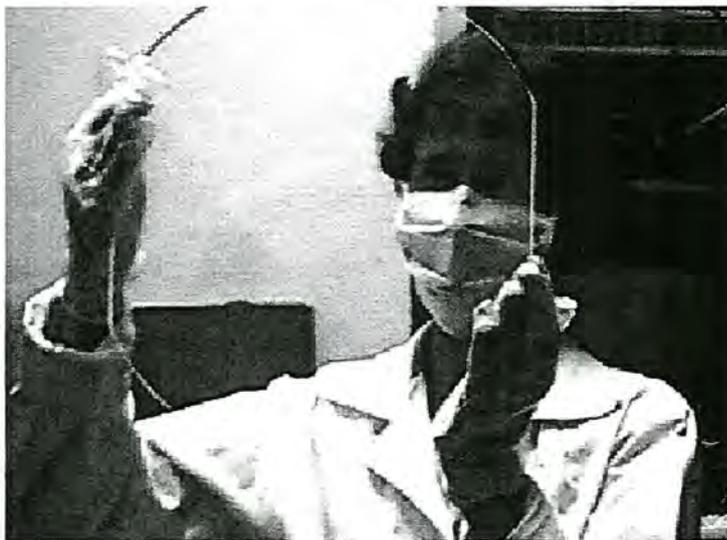


Рис. 12. Образец кристалла DKDP размером 330x320x20 мм, выращенный по технологии быстрого роста в ИПФ РАН

Программа создания такой установки предусматривает поэтапное наращивание ее мощности. К настоящему времени создана стартовая система с выходной мощностью до 1 ТВт. Проведены исследования физики параметрического усиления. Отработаны основные элементы создаваемой системы, включая стретчер, большеапертурный компрессор и параметрические усилители на основе кристаллов DKDP. В экспериментах на выходе установки получена энергия около 10 Дж при длительности скомпрессированного импульса 72 фс, что соответствует мощности лазерного излучения около 130 ТВт [52]. Полномасштабный пуск системы с уровнем мощности 1 ПВт запланирован на 2006 г.

Заключение

1. Лазерная стендовая база, созданная в РФЯЦ-ВНИИЭФ, уникальна. Она является достоянием научного сообщества России и открыта для проведения исследований в области физики высоких плотностей энергии специалистами различных научных институтов.

2. Создание мощных лазерных установок в РФЯЦ-ВНИИЭФ и проведение на них экспериментов по физике высоких плотностей энергии способствует развитию в России технологий в области лазерной техники, оптики, импульсной энергетики и измерительной техники.

3. РФЯЦ-ВНИИЭФ создает мощную лазерную установку национального масштаба "Искра-6", которая позволит провести эксперименты по сжатию термоядерной мишени вблизи порога ее зажигания, а также позволит проводить как фундаментальные, так и прикладные исследования в области физики высоких плотностей энергии. Реализуемость проекта подтверждена созданием установки "Луч" и проведением на ней ключевых экспериментов по усилению лазерного излучения.

4. Совместно с РАН разработана концепция и создается лазерная система петаваттного уровня, которая позволит исследовать физику взаимодействия лазерного излучения с веществом при интенсивностях порядка 10^{21} Вт/см².

Список литературы

1. Попов Н. А. АДС и ЛТС // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992. Вып. 4. С. 53.
2. Басов Н. Г., Крохин О. Н. Условия разогрева плазмы излучением оптического генератора // ЖЭТФ. 1964. Т. 46. С. 171–175.
3. Nuckols J. Wood L. Thiessen A. et al. Laser compression of matter to super high densities thermonuclear (CTR) application // Nature. 1972. Vol. 239. P. 139–142.
4. Басов Н. Г., Крохин О. Н., Склизков Г. В. Мощная лазерная установка и исследование эффективности высокотемпературного нагрева плазмы // ЖЭТФ. 1972. Т. 62. С. 203–212.
5. Bolotin V. A., Burdonsky I. N., Gavrilov V. V. et al. Diagnostic complex for investigations of laser fusion physical processes // Review of Science Instruments. 1991. Vol. 61. P. 3259–3261.
6. Андреев А. А., Анучин М. Г., Бородин В. Г. и др. Результаты ЛТС – экспериментов на установке "Прогресс" и их интерпретация // ЖЭТФ. 1989. Т. 95. С. 528–535.

7. Басов Н. Г., Данилов А. Е., Михайлов Ю. А. и др. Система концентрации излучения в лазерных термоядерных установках. Лазерная термоядерная установка "Дельфин" // Труды ФИАН СССР. Т. 178. С. 89–119. М.: Наука, 1987.
8. Кормер С. Б. Фотодиссационные лазеры для управляемого термоядерного синтеза // Изв. АН СССР 44. Сер.: физическая. 1980. С. 2002–2017.
9. Волвенко В. В., Зуев А. И., Иванов А. Ф. и др. Рентгеновские изображения стеклянных газонаполненных микросфер, облучаемых на лазерной установке "Сокол" // Квантовая электроника. 1983. Т. 10. С. 2350–2352.
10. Th. J. Gilmartin Nova: The Laser Fusion Scientific Experiment, LLNL, report presented on ICF Topical Meeting, San Diego, California, 7–9 February 1978.
11. Initial Performance Results of the OMEGA Laser System. LLE Annual Report, 99–109, University of Rochester, 1995.
12. Yamanaka C. Overview of Inertial Fusion Energy. Proceedings of the IAEA Technical Committee Meeting on Drivers for Inertial Confinement Fusion at Osaka. Japan 15–19 April 1991. Institute of Laser Engineering, Osaka University. 1992. P. 1–7.
13. Анненков В. И., Багрецов В. А., Гайдаш В. А. и др. Импульсный лазер мощностью 120 ТВт "Искра-5" // Квантовая электроника. 1991. Т. 18. С. 536–537.
14. Haan S. W., et al. // Phys. Plasmas. 1995. Vol. 2. P. 2480.
15. CEL-V Laser Team, Overview of ICF Program at Centre D'Etudes de Limeil-Valenton. 12th International Conference, Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, Osaka, Japan 1995 // AIP Conference Proceedings. 1995. Vol. 369. P. 40–52.
16. Galakhov I. V., Garanin S. G., Eroshenko V. A. et al. Concept of Iskra-6 Nd-laser facility // Fusion Engineering and Design. 1999. Vol. 44. P. 51–56.
17. Долголева Г. В. Методика расчета движения двухтемпературного излучающего газа (СНД) // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Численные решения задач математической физики. 1983. Вып. 2. С. 29–33.
18. Бельков С. А., Гайдук С. Н., Гаранин С. Г. и др. Модель поглощения и энерговыделения лазерного излучения и "горячих" электронов в сферической плазме // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1990. Вып. 1. С. 76–83.
19. Lindl J. Development of the indirect drive approach to confinement fusion and the target physics for ignition and gain. Preprint LLNL, UCRL-JC-119015, L19821-1, 1995.
20. Боков Н. Н., Бунатаян А. А., Лыков В. А. и др. О возможности снижения чувствительности микромишени к несимметрии лазерного облучения // ПМТФ. 1983. Т. 1. С. 20–21.
21. Гамалий Е. Г., Демченко Н. Н., Лебо И. Г. и др. Теоретическое исследование устойчивости сжатия тонкостенных оболочечных мишеней, облучаемых лазерами с энергией импульса порядка 1 кДж // Квантовая электроника. 1988. Т. 15. С. 1622–1632.
22. Atzeni S., Guerrieri A. 2D-Simulation of the implosion, collapse and stagnation of laser fusion shells 16th European Cont. on Controlled Fusion and Plasma-Physics, Venezia, 13–17 March, 1989.

23. Бельков С. А., Гаранин С. Г., Долголева Г. В. и др. Расчетное исследование влияния неоднородности лазерного облучения на работу термоядерных мишеней в условиях малых сжатий // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1990. Вып. 2. С. 25–29.
24. Софронов И. Д., Бельков С. А., Винокуров О. А., Мхитарян Л. С., Рябикина Н. А. Методика расчета спектрального переноса излучения в двумерном комплексе МИМОЗА-НД // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2000. Вып. 1. С. 8–15.
25. Holstein P. A., Meyer B., Rostaing M. et al. // *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris*. 1988, Vol. 307. P. 211.
26. Бельков С. А., Винокуров О. А., Гаранин С. Г. и др. О влиянии неоднородностей диагностического лазерного пучка на интерпретацию экспериментов по турбулентному перемешиванию // Квантовая электроника. 2000. Вып. 30. С. 884–888.
27. Андронов В. А., Мешков В. В., Никифоров В. В. и др. Экспериментальные исследования и численное моделирование турбулентного перемешивания в одномерных течениях // Докл. АН СССР. 1982. Т. 264. С. 76.
28. Nikiforov V. V. Calculation of gravitational turbulent mixing in non-automodel flows. Proc. Of 4th Intern. Workshop on Physics of Compressible Turbulent mixing. Cambridge (Great Britain). March 29 – April 1, 478, 1993.
29. Бельков С. А., Андронов В. А., Долголева Г. В. и др. Влияние спектрального переноса рентгеновского излучения на развитие турбулентного перемешивания при лазерном ускорении мишеней // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1997. Вып. 3. С. 25–32.
30. Cable M. D., Hatchett S. P., Caird J. A., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1994. Vol. 43. P. 2316–2319.
31. Yamanaka C., Nakai S., Yabe T. et al. Laser Implosions of high – aspect ratio targets produced thermonuclear neutron yields exceeding 10^{12} by use of shock multiplexing // *Phys. Rev. Lett.* 1986. Vol. 56. P. 1575–1578.
32. Campbell E. M., Hant J. T., Bliss E. S. et al. Nova Experimental Facility (Invited) // *Rev. Sci. Instrum.* 1986. Vol. 57. P. 2101.
33. Norreys P. A., Krushelnick K. M., Zepf M. PW laser: matter in extreme laser fields // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2004. Vol. 46. P. B13–B21.
34. Shenye L., Wenhong L, Xiaohua J., Yongkun D. Laser-plasma interaction in hohlraum plasmas at SGII laser facility. 31st EPS Conference on Plasma Phys., London, 28 June – 2 July, 2004, ECA Vol. 28G, P-2.057, 2004.
35. Безнасюк Н. Н., Галахов И. В. Гаранин С. Г. и др. Мощная лазерная установка на неодимовом фосфатном стекле ЛУЧ – прототип модуля установки ИСКРА-6 // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Саров. 2002. Вып. 3. С. 232–247.
36. Beznasyuk N. N., Galakhov I. V., Garanin S. G., et al. The four-channel laser facility LUCH – a module of the ISKRA-6 facility. XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter ECLIM-2002. Moscow, Russia, 7–11 October 2002. Book of Abstracts. P. 61.
37. Kochemasov G. G. Laser Interaction with Matter. Proceeding of the 23 ECLIM, 19–23 September 1994. Oxford.

38. Абзасв Ф. М., Бельков С. А., Бессараб А. В. и др. Сжатие и нагрев сферических термоядерных мишеней при непрямом (рентгеновском) облучении на установке ИСКРА-5 // ЖЭТФ. 1998. Т. 114. С. 155.
39. Бельков С. А., Бессараб А. В., Винокуров О. А. и др. Исследование влияния крупномасштабной асимметрии оболочки на работу мишени на установке ИСКРА-5 // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. С. 161.
40. Afanasieva V. A., Bazin A., Bessarab A. et al. Investigation of X-Ray Transport and Materials Heating on Iskra-5 Laser. Inertial Fusion Science and Applications 2001. Editor K. A. Tanaka, D. D. Meyerhofer, J. Meyer-ter-Vehn, Elsevier, Paris, 532–535, 2002.
41. Van Wonterghem B. M., Murray J. R., Campbell J. H., et al. Performance of a prototype for a large-aperture multipass Nd:glass laser for inertial confinement fusion // Applied Optics. 1997. Vol. 36. P. 4932–4953.
42. Cavallier C., Fleurot N., Lonjaret T., Di-Nicola J. M. Prospects and progress at LIL and Megajoule // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2004. Vol. 46. P. B135–B141.
43. Воронич И. Н., Гаранин С. Г., Зарецкий А. И. и др. Получение высокого коэффициента усиления в дисковом усилительном каскаде с элементами из неодимового фосфатного стекла // Квантовая электроника. 2004. Т. 34. P. 509–510.
44. Гаранин С. Г., Зарецкий А. И., Ильяев Р. И. и др. Канал мощной установки "Луч" для ЛТС с энергией импульса 3,3 кДж и длительностью 4 нс // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 4. С. 299–301,
45. Norby J. Petawatt lasers aim for relativistic phenomena // Laser Focus World. 2005. Vol. 41, No 1. P. 101–105.
46. Barty C. P. J., Key M., Brown J., et al. Motivations and challenges for high energy petawatt lasers at the National Ignition Facility. Conference on Lasers & Electro-Optics CLEO/IQEC – 2004. San Francisco, California, USA, May 17-20, 2004. CLEO/IQEC and PhAST Technical Digest on CD-ROM (The Optical Society of America, Washington, DC, 2004), presentation JTUG4.
47. Neely D., Clarke R., Collier J., et al. The VULCAN petawatt interaction facility. Report on XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM-2002), 7–11 October 2002, Moscow, Russia. Book of abstracts. P. 78.
48. Collier J. L., Chekhlov O., Clarke R. J., et al. The Astra Gemini Project: a High Repetition Rate Dual Beam Petawatt Laser Facility. Conference on Lasers & Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science and Photonics Applications, Systems and Technologies CLEO-2005 (The Optical Society of America, Washington, DC, 2005), presentation JFB1.
49. Aoyama M., Yamakawa K., Akahane Y., et al. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser // Optics Letters. 2003. Vol. 28, No 17. P. 1594–1596.
50. Kitagava Y., Tanaka K.A., Kodama R., et al. Petawatt laser heating of imploded plasmas and related studies at ILE, Osaka university. Report on XXVII European Conference on Laser Interaction with Matter, 7–11 October 2002, Moscow, Russia. Book of abstracts. P. 74.
51. Blanchot N., Bignon E., Coic H., et al. Technical Issues in the Multi-PETAWATT LASER Facility Project on the Ligne d'Integration Laser (LIL). in Conference Inertial Fusion Sciences and Applications – 2003. Presentation Wpo 4.37. P. 642–645.

52. Андреев Н. Ф., Беспалов В. И., Бредихин В. И., Гаранин С. Г., Гинзбург В. Н., Дворкин К. Л., Катин Е. В., Корытин А. И., Ложкарев В. В., Палашов О. В., Рукавишников Н. Н., Сергеев А. М., Сухарев С. А., Фрейдман Г. И., Хазанов Е. А., Яковлев И. В. 100-тераваттный фемтосекундный лазер на основе параметрического усиления // Письма в ЖЭТФ. 2005. Т. 82. Вып. 4. С. 196–199.
53. Ross I. N., Matousek P., Towrie M., Langley A. J., Collier J. L. The prospect for ultrashort pulse duration and ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplifiers // Optics Communications. 1997. Vol. 144. P. 125–133.
55. Пискарскас А., Стабинис А., Янкаускас А. // УФН. 1986. Т. 150. С. 127.
56. Андреев Н. Ф., Беспалов В. И., Бредихин В. И., Гаранин С. Г., Гинзбург В. Н., Дворкин К. Л., Катин Е. В., Корытин А. И., Ложкарев В. В., Палашов О. В., Рукавишников Н. Н., Сергеев А. М., Сухарев С. А., Фрейдман Г. И., Хазанов Е. А., Яковлев И. В. Новая схема петаваттного лазера на основе невырожденного параметрического усиления чирпированных импульсов в кристаллах DKDP // Письма в ЖЭТФ. 2004. Т. 79. Вып. 4. С. 178–182.

Investigation into Thermonuclear Fusion at High-Power Laser Facilities

R. I. Ilkayev, S. G. Garanin

Results of investigation into physics of thermonuclear target compression carried out at VNIIEF are considered. Parameters of laser facilities needed to ignite thermonuclear fuel are estimated. Results of experimental studies on the dynamics of target compression under indirect irradiation at the facility "Iskra-5" are discussed. Designs of a high-power megajoule laser facility "Iskra-6" and a petawatt femtosecond laser system are considered.