УДК 621.375.8

Основные результаты работ по исследованию лазеров с ядерной накачкой во ВНИИЭФ

Представлен краткий обзор исследований лазеров с ядерной накачкой, проведенных во ВНИИЭФ.

- А. А. Пикулев, А. А. Синянский,
- С. П. Мельников, В. М. Цветков,
- С. Л. Турутин, А. Н. Кузнеченков

Введение

Исследования, направленные на использование ядерной энергии для накачки лазеров, ведутся во ВНИИЭФ с конца 1960-х гг. [1]. Интерес к этой проблеме был вызван возможностью использования для накачки лазеров мощных, компактных и энергоемких источников ядерной энергии и возможностью создания мощных и энергонезависимых лазерных установок, которые получили название реакторов-лазеров (РЛ). В активной зоне (АЗ) реактора-лазера, состоящей из делящегося вещества и лазерной среды, происходит прямое преобразование выделившейся ядерной энергии в лазерное излучение, минуя промежуточную стадию тепловой энергии.

Первые успешные эксперименты по накачке лазеров ядерным излучением были выполнены во ВНИИЭФ в 1972 г. при возбуждении смеси Не-Хе осколками деления урана. Источником нейтронов служил импульсный ядерный реактор ВИР-2 с длительностью импульса ~4 мс.

Для изучения лазеров с ядерной накачкой (ЛЯН) во ВНИИЭФ в разное время применялись импульсные реакторы ВИР-1, ВИР-2, ТИБР-1М, БР-1, БИГР с длительностями импульсов нейтронного и γ-излучения от 100 мкс до 1 с (квазиимпульсный режим реактора БИГР). Основной объем исследований был выполнен с использованием экспериментальных комплексов на базе реакторов ВИР-2М и БИГР [1].

Экспериментальный комплекс на реакторе ВИР-2М

На базе водного импульсного реактора ВИР-2М (энерговыделение в активной зоне до 56 МДж, длительность нейтронного импульса ≥3 мс) создан экспериментальный комплекс, пред-

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЛАЗЕРОВ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ...

назначенный для поиска и исследования характеристик активных сред и отработки элементов конструкции ядерно-лазерных устройств [2]. В состав комплекса входят лазерные установки ЛУНА-2М, ЛУНА-2П (рис. 1) и ЛЯН-2Т. Возбуждение газовых сред осуществляется осколками деления урана (лазерные установки ЛУНА-2М, ЛУНА-2П) и продуктами ядерной реакции ³He(n, p)³H (установка ЛЯН-2Т).



Рис. 1. Установки ЛУНА-2М (а) и ЛУНА-2П (б) в нижнем зале реактора ВИР-2М

В экспериментах на реакторе ВИР-2М выполнен большой объем работ по поиску и оптимизации параметров лазеров, изучению их энергетических и спектральных характеристик, исследованию неоднородностей плотности газовых сред, расходимости лазерного излучения в зависимости от параметров резонатора и др. В последние годы основным направлением является исследование различных схем формирования излучения многоканальных ЛЯН [3].

К настоящему времени на экспериментальном комплексе получена генерация примерно на 40 переходах атомов Xe, Kr, Ar, Ne, C, N, O, Cl и ионов Cd⁺, Zn⁺ в видимой и инфракрасной областях спектра при возбуждении газовых смесей осколками деления урана, а также продуктами ядерных реакций ³He(n, p)³H и ¹⁰B(n, α)⁷Li. В экспериментах был получен достаточно высокий КПД (до 2,5 %) преобразования энергии осколков деления в лазерное излучение и продемонстрирована работоспособность ЛЯН при облучении нейтронными потоками стационарных ядерных реакторов [1].

На реакторе ВИР-2М выполнен цикл интерферометрических исследований, посвященных определению оптических неоднородностей, возникающих как в герметичных, так и в прокачных каналах ЛЯН. Эксперименты проводили на лазерной установке ЛУНА-2М и прокачном макете ЛУНА-2П с помощью интерферометров Майкельсона и Маха – Цендера. Результаты экспериментов применяли для определения температуры и плотности газа, а также распределения мощности накачки по объему лазерного канала [4] (рис. 2).

На установке ЛУНА-2М проведены эксперименты по исследованию различных схем формирования лазерного излучения: генератор – усилитель; сложение излучения двух лазерных каналов





Рис. 2. Интерферограммы, зарегистрированные на установке ЛУНА-2П (а), и пример результатов обработки интерферограммы (б)

с помощью схем последовательного и параллельного сложения (рис. 3, см. также цв. вкл.); фазирование излучения двух лазерных каналов посредством оптической связи; использование углового фокального фильтра; использование неустойчивого резонатора [3]. Результаты исследований позволили наметить пути формирования излучения многоканальных ЛЯН и определить способы улучшения параметров лазерного пучка.



Рис. 3. Схема параллельного сложения двух лазерных каналов (а) и мощность генерации одинарного и сложенного лазерных каналов (б)

Экспериментальный комплекс на реакторе БИГР

Экспериментально показано, что для работы реактора-лазера в непрерывном режиме необходимо выполнить два основных условия: обеспечить накачку лазерной среды ядерными излучениями и организовать прокачку газовой смеси в лазерных каналах, чтобы устранить ее перегрев. С учетом этих условий в 1994 г. во ВНИИЭФ был введен в эксплуатацию лазерный модуль ЛМ-4 для совместной работы с импульсным реактором БИГР, способным генерировать нейтронные импульсы длительностью порядка 1 с [5].

Лазерный модуль ЛМ-4 (рис. 4,*a*) состоит из четырех лазерных каналов сечением 20×60 мм и активной длиной 100 см. На боковые стенки каналов с размерами 100×6 см² нанесены слои металлического урана-235 толщиной около 5 мг/см². Лазерные каналы модуля включены в единую газовую петлю и разделены между собой теплообменниками, с помощью которых происходит охлаждение рабочего газа.

В проведенных в 1994 г. на комплексе ЛМ-4/БИГР экспериментах была продемонстрирована непрерывная генерация ЛЯН и показана эффективность способа поперечной прокачки газа. На лазерном модуле ЛМ-4 также исследована динамика распределения лазерного излучения в ближней зоне (рис. 5, см. также цв. вкл.) и оптические неоднородности, возникающие в лазерных каналах (рис. 6) [5].

В дальнейших экспериментах с модулем ЛМ-4 один из каналов был использован для интерферометрических исследований оптического качества газовых сред, а два (затем три) канала были сложены в единую генерационную цепочку с помощью зеркальных отражателей и единого оптического резонатора. Эксперименты показали возможность применения последовательной схемы сложения лазерных каналов в лазерно-ядерных устройствах непрерывного действия (см. рис. 4,6).



Рис. 4. Лазерный модуль ЛМ-4 (а) и мощность генерации одинарного и сложенного лазерных каналов (б)



Рис. 5. Динамика лазерного излучения ЛМ-4 во время импульса реактора БИГР (а) и распределение излучения ЛМ-4 в ближней зоне (б)

В 2007 г. взамен модуля ЛМ-4 был введен в эксплуатацию восьмиканальный лазерный модуль ЛМ-8 (рис. 7, см. также цв. вкл.). В оптической схеме модуля предусмотрено последовательное сложение четырех и двух лазерных каналов, два канала являются одинарными [5].

На лазерном модуле ЛМ-8 проведены эксперименты по исследованию схемы последовательного сложения двух и четырех лазерных каналов, изучено влияние окон Брюстера на параметры

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЛАЗЕРОВ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ...



Рис. 6. Интерферограммы бокового сдвига, полученные на модуле ЛМ-4 (а) и пример результатов обработки интерферограмм (б)



Рис. 7. Лазерный модуль ЛМ-8 (а) и поперечное сечение его активной зоны (б)

генерации одинарного лазерного канала, определено распределение лазерного излучения в ближней и дальней зонах. На ЛМ-8 зарегистрированы рекордные для лазерных модулей с ядерной накачкой непрерывного действия значения мощности генерации одинарного лазерного канала (25 Вт при длительности работы около 1 с).

Работы по созданию макета реактора-лазера

На основе экспериментальных и теоретических исследований во ВНИИЭФ была выработана концепция реактора-лазера – автономного ядерно-физического устройства, совмещающего функции лазерной системы и ядерного реактора и осуществляющего прямое преобразование энергии ядерных реакций в лазерное излучение.

Исходя из опыта эксплуатации исследовательских ядерных реакторов и лазерных комплексов во ВНИИЭФ, были выполнены предварительные оценки основных энергетических, ядернофизических, технических и эксплуатационных параметров различных вариантов реакторов-лазеров с мощностью лазерного излучения 100 кВт и выше, работающих от долей секунд до непрерывного режима. Рассматривались реакторы-лазеры с аккумулированием тепла в активной зоне реактора в пусках, продолжительность которых ограничена допустимым нагревом АЗ (теплоемкостный РЛ), и РЛ непрерывного действия с выносом тепловой энергии за пределы АЗ (рис. 8, см. также цв. вкл.) [6].



Рис. 8. Теплоемкостный РЛ (а) и РЛ непрерывного действия (б)

С начала 1980-х гг. во ВНИИЭФ велись работы по созданию макета реактора-лазера непрерывного действия. Макет включает в себя реактор ИКАР-500 и 16-канальный лазерный модуль ЛМ-16 (ядерно-физический комплекс ЛМ-16/ИКАР-500). АЗ реактора ИКАР-500 представляет собой графитовую матрицу (куб со стороной 240 см) с девятью сквозными ячейками сечением 50 × 50 см, в которых размещаются реакторные модули. В одной из сквозных ячеек вместо реакторного модуля должен размещаться лазерный модуль ЛМ-16. Планируемое энерговыделение в АЗ реактора ИКАР-500 составляет 350 МДж, оцениваемая энергия лазерного излучения не менее 20 кДж.

На комплексе ЛМ-16/ИКАР-500 предполагалось отработать основные технологические и инженерные решения, которые будут использованы при создании РЛ непрерывного действия, осуществляющего прямое преобразование ядерной энергии в лазерное излучение [6].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ЛАЗЕРОВ С ЯДЕРНОЙ НАКАЧКОЙ...

Для исследования ядерно-физических характеристик АЗ реактора ИКАР-500 создан критический стенд (СКС) ИКАР-С [7]. Основная цель исследований с критическим стендом – выбор конфигурации реакторных секций, обеспечивающей требуемый запас реактивности АЗ реактора. В 2014 г. были завершены работы по физическому пуску СКС ИКАР-С (рис. 9, см. также цв. вкл.) с центральным уран-графитовым модулем, предназначенным для обеспечения необходимого температурного коэффициента гашения реактивности АЗ реактора ИКАР-500.

Для проведения данных работ во ВНИИЭФ была разработана высокоэффективная технология изготовления уран-графитового топлива, основанная на введении урана в матрицу путем пропитки пористого графитового блока раствором металлоорганического соединения урана. По данной технологии было изготовлено 240 уран-графитовых блоков для формирования центрального модуля АЗ реактора ИКАР-500.



а

Рис. 9. СКС ИКАР-С (а) и транспортно-загрузочный стенд СКС ИКАР-С (б)

Разработка компактных реакторно-лазерных устройств импульсного действия

В настоящее время в РФЯЦ-ВНИИЭФ ведется расчетно-проектная разработка компактных реакторно-лазерных устройств импульсного действия. Основное внимание уделяется двум конфигурациям (рис. 10, см. также цв. вкл.): РЛ с внешней активной зоной и РЛ вида запальный реакторумножитель нейтронов. В первом случае АЗ реакторно-лазерного блока представляет собой пустотелый цилиндр, состоящий из двух-трех частей, разнесенных по длине АЗ, внутри которого размещается цилиндрический лазерный модуль, окруженный замедлителем. Данная система позволяет сформировать достаточно короткий импульс накачки (~1 мс), но имеет низкое энерговыделение в лазерном модуле по сравнению с полным энерговыделением (несколько процентов). В данной



Рис. 10. Конфигурации компактных РЛ импульсного действия: а – РЛ с внешней активной зоной; б – РЛ вида запальный реактор-умножитель нейтронов

схеме имеется возможность использовать только один лазерный модуль (из-за ограниченности размеров полости в АЗ реактора).

Во втором случае в центре РЛ находится цилиндрический запальный реактор, вокруг которого расположено несколько лазерных модулей. Снаружи вся сборка окружена отражателем нейтронов. Длительность импульса накачки в данной системе ~10 мс, энерговыделение в лазерных модулях составляет 10–20 %. Данная схема позволяет использовать несколько лазерных модулей (на рис. 10,6 показан вариант с шестью модулями).

Список литературы

1. Мельников С. П., Сизов А. Н., Синянский А. А. Лазеры с ядерной накачкой. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008.

2. Воинов А. М., Довбыш Л. Е., Кривоносов В. Н. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 63–68.

3. Пикулев А. А., Патянин С. В., Синянский А. А. и др. // Сб. докл. «Х Харитоновские тематические научные чтения». – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2008. С. 219–223.

4. Пикулев А. А., Влох Г. В., Лимарь Ю. М. и др. // ЖТФ. 2012. Т. 82, № 8. С. 89–96.

5. Синянский А. А. // Тр. III Международ. конф. «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы». – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2003. С. 377–387.

6. Воинов А. М., Воронцов С. В., Кривоносов В. Н. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2007. Вып. 2. С. 19–28.

7. Воинов А. М., Влох Г. В., Воронцов С. В. и др. Стенд критических сборок ИКАР-С. Результаты физического пуска // Там же. С. 29–33.

Main Results of Investigations of Nuclear-Pumped Lasers in VNIIEF

A. A. Pikulev, A. A. Sinyanskii, S. P. Melnikov, V. M. Tsvetkov, S. L. Turutin, A. N. Kuznechenkov

The short review of researches of nuclear-pumped lasers conducted in VNIIEF is presented.