

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКИ ЛАЗЕРОВ В ИЛФИ

Г. А. КИРИЛЛОВ

В 2010 г. исполняется 50 лет со дня создания первого квантового генератора когерентного светового излучения оптического диапазона — лазера, который относится наряду с мазером по принципу работы к отдельной области физики — квантовой электронике.

Принцип работы лазеров основан на трех фундаментальных идеях. Первая идея — введение понятия и обоснование процесса вынужденного излучения. Она сформулирована Эйнштейном (1916 г.), применительно к теории некогерентного теплового излучения. Вторая идея — применение термодинамически неравновесных систем (или систем с отрицательной температурой) для усиления света — предложение В. А. Фабриканта (1940 г.). И третья идея, имеющая радиофизические корни, — применение положительной обратной связи в виде объемного резонатора для генерации СВЧ-излучения и открытого резонатора типа интерферометра Фабри–Перо для генерации излучения оптического диапазона.

За разработку фундаментальных основ работы мазеров и лазеров Н. Г. Басову, А. М. Прохорову и Ч. Таунсу в 1964 г. была присуждена Нобелевская премия. Создателем первого образца лазера на кристалле рубина является Т. Майман (1960 г.).

Теперь остановимся на тех идеях, которые были высказаны и реализованы в области физики лазеров сотрудниками ИЛФИ. Во ВНИИЭФ точкой отсчета в исследованиях в области физики и техники лазеров следует считать 13 марта 1963 г. В этот день Ю. Б. Харитон провел совещание с целью выработки предложений (программ) по исследованию физики лазеров применительно к задачам основной тематики ВНИИЭФ. Я. Б. Зельдович рассказал о принципах работы лазеров. Фактически на этом совещании было высказано два соображения: применение лазерного излучения для инициирования взрывчатых веществ (Я. Б. Зельдович, В. К. Чернышев) и использование свечения фронта ударной волны в благородных газах для световой накачки лазеров (Я. Б. Зельдович, С. Б. Кормер, Г. А. Кириллов).

Первая работа по рассмотрению возможности накачки лазеров на неодимовом стекле свечением фронта ударной волны была выполнена в начале 1965 г. Применение свечения фронта ударной волны для накачки лазеров открыло путь для создания мощных импульсных лазеров при решении задач различной направленности.

Схема первого лазера с взрывной накачкой представлена на рис. 1. Первый опыт был проведен 30 декабря 1965 г. на экспериментальном полигоне ВНИИЭФ, но ожидаемой энергии и мощности излучения не получили. В результате последующих исследований был обнаружен неожиданный эффект — возбуждение генерации в рабочем веществе перед фронтом ударной волны. Понять, что действительно лазерная генерация возбуждается перед фронтом ударной волны было не так просто. В обсуждении этого вопроса принимали участие С. Б. Кормер, М. В. Синицын, Г. А. Кириллов, А. И. Куряпин, В. Д. Урлин (ВНИИЭФ), В. С. Зуев, В. А. Катулин, Б. Л. Борович (ФИАН), но пальму первенства следует отдать С. Б. Кормеру и В. С. Зуеву. Разработка гомогенного варианта йодного фотодиссоционного лазера привела к созданию лазера с энергией излучения ~ 1 МДж. На пути создания такого лазера необходимо было обеспечить в большом объеме $J_0/D > N_n$, где J_0 — интенсивность свечения фронта ударной волны, D — скорость ударной волны, N_n — пороговая концентрация возбужденных частиц для возникнове-

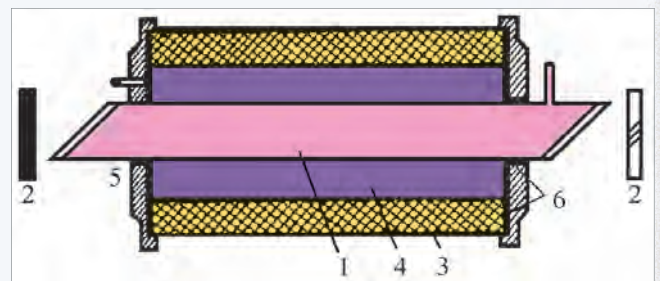


Рис. 1. Лазерное устройство с взрывной накачкой: 1 — кварцевая труба с рабочим веществом; 2 — зеркала резонатора; 3 — заряд ВВ; 4 — полость заряда, заполненная ксеноном; 5 — торцевые крышки; 6 — резиновые уплотнители

ния лазерной генерации. Это условие нам удалось реализовать.

На пути развития химических лазеров на смесях фтора и водорода с целью получения высокой удельной энергии излучения, кроме применения взрывной накачки, сыграло большую роль предложение по применению гексафторида серы (SF_6) в качестве компонента рабочей среды (С. Д. Великанов, С. Б. Кормер, Ю. В. Савин, М. В. Сеницын, В. Д. Урлин). Газообразный SF_6 позволяет стабилизировать температуру рабочей среды в процессе генерации за счет увеличения теплоемкости при росте температуры. Теплоемкость увеличивается за счет включения колебательных степеней свободы. При таком подходе удалось получить рекордный энергосъем в ~ 250 Дж/л. Важным для работы химического (HF) лазера явилась реализация состава рабочей смеси с высоким содержанием фтора (F_2): до 600 Торр. Такая смесь взрывоопасна, требует тщательной очистки рабочих кювет, строгой последовательности напуска компонента рабочей среды и обязательно кислорода (O_2) — ингибитора, препятствующего развитию спонтанной реакции фтора и водорода, но в предельно малой концентрации (0,5 % от F_2). Получение и применение такой технически сложной рабочей смеси позволило реализовать для химлазеров с фотоиницированием удельный энергосъем в 250 Дж/л. Наиболее высокий технический КПД (более 100 %) получен при накачке электронами, рождающимися в рабочей среде за счет электролиза.

В связи с разработкой проекта создания мощного газодинамического лазера на комплексе «Ява» сотрудники ИЛФИ провели исследования и оптимизацию работы газодинамических лазеров различных типов. Значимые результаты по увеличению удельного энергосъема удалось получить при исследовании работы смесового варианта газодинамического лазера, где в поток нагретого азота впрыскивается рабочий газ (CO_2) в смеси с газом-релаксантом (He, пары H_2O).

Применением соплового блока с системой смешения, предложенной Б. А. Выскубенко и Ю. В. Колобяниным, удельный энергосъем удалось увеличить до 55 Дж/г, то есть в три раза. Отличие этих схем смешения состоит в том, что в первой схеме поток CO_2 имеет тангенциальную составляющую скорости к потоку нагретого азота, а во второй схеме тангенциальная составляющая скорости потока CO_2 близка к нулю. В первой схеме в сопле, как видно из рис. 2, наблюдаются скачки уплотнения, повышается поступа-

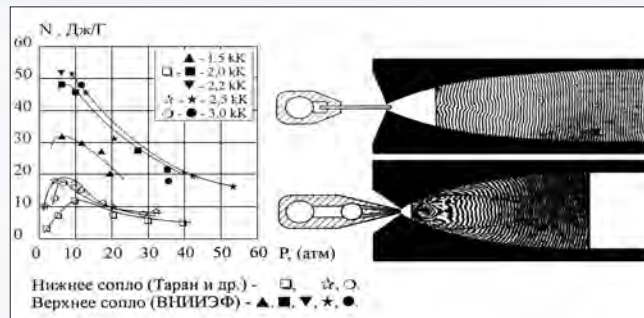
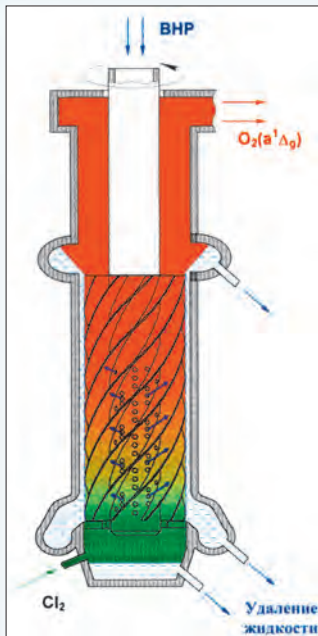


Рис. 2. Сравнение удельного энергосъема и однородности потоков газодинамических лазеров с различными системами смешения

тельная температура, а во втором случае таких скачков нет, что приводит к увеличению удельного энергосъема (мировой рекорд).

Одним из перспективных источников непрерывного лазерного излучения является йодно-кислородный лазер. Основным узлом такого лазера является генератор возбужденного (синглетного) кислорода. От его производительности (количество генерируемого возбужденного кислорода в единицу времени, степени возбужденного кислорода в потоке, давления на выходе) зависят и основные характеристики. Поэтому важным моментом для работы йодно-кислородного лазера явилось изобретение и реализация генератора синглетного кислорода нового типа. Суть изобретения состоит в том, что в предложенном устройстве за счет быстрого вращения шнека (рис. 3) происходит разбиение рабочей жидкости (смесь $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{KOH}$) на мелкие капли, что позволяет значительно увеличить площадь взаимодействия частиц рабочей жидкости с газообразным хлором. Жидкость выбрасывается на лопатку шнека через отверстия в центральной трубке (~ 4500 отверстий диаметром 0,3 мм). Это и позволяет разбить жидкость на мелкие капли и значительно увеличить площадь взаимодействия жидкости и хлора. Получился достаточно эффективный ГСК, лучший в мире.

Для йодно-кислородного лазера принципиальным вопросом является создание оптимальной системы смешения возбужденного кислорода и молекулярного йода. Описанные системы смешения, в которых инжекция молекулярного йода с газом-разбавителем (азотом) осуществляется поперечно потоку энергонесущего газа через отверстия в сопловых лопатках, вряд ли можно считать оптимальными. Исследования по выбору оптимальной системы смешения позволяют с большей долей уверенности утверждать, что си-



Рабочее давление	До 100 Торр
Скорость газа в реакторе	До 40 м/с
Степень возбуждения кислорода	Более 90 %
Химическая эффективность	До 75 %

Рис. 3. Схема генератора синглетного кислорода с закрученным аэрозольным потоком и его основные характеристики

система смешения, основанная на инъекции смеси молекулярного йода с газом-носителем (гелий или азот), в виде сверхзвуковых струй, спутных потоку синглетного кислорода вблизи критической области сопла, перспективна для применения. Новая схема смешения для сверхзвуковых йодно-кислородных лазеров благодаря своей гибкости позволяет эффективно смешивать газы с сильно различающимися объемными расходами, варьировать состав газовой среды и т. д., что дает ей преимущества перед поперечной системой подачи через отверстия в стенках сопла. В результате применения генератора синглетного кислорода с закрученным потоком и системы смешения на спутных следах получена рекордная химическая эффективность — 33 %. В ИЛФИ создан стенд йодно-кислородного лазера, в котором используются новейшие достижения в устройстве основных узлов с мощностью выходного лазерного излучения ~ 65 кВт.

Весьма остро стоял и стоит вопрос о повышении яркости излучения мощных лазеров и, в первую очередь, уменьшении расходимости излучения до 10^{-4} – 10^{-5} рад. Определяющим фактором, ответственным за расходимость излучения, является оптическая неоднородность рабочей среды, величина которой для большинства генераторов составляет $\Delta n \sim 10^{-6}$. Радикальным средством уменьшения Δn в фотодиссоционном лазере является понижение давления рабочего ве-

щества и ксенона. Конечно, это привело к понижению удельной энергии излучения, но в сочетании с удачным предложением о применении в задающем генераторе резонатора с нерезонансной обратной связью и угловым селектором позволило получить расходимость $\sim 10^{-4}$ рад и яркость излучения $\sim 10^{12}$ Дж/ср.

Предложенные линейные методы уменьшения расходимости излучения имеют предел на пути повышения яркости излучения. Далее дело за нелинейными методами, в первую очередь, за методом обращения волнового фронта при вынужденном рассеянии Манделъштама–Бриллюэна (ВРМБ). Это позволяет скомпенсировать фазовые искажения лазерных пучков при прохождении их в усиливающих средах. Ясно, что определяющим моментом, влияющим на эффективность работы систем компенсации, является точность воспроизведения волнового фронта входного лазерного излучения в кювету ВРМБ. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что высокое качество обращения можно реализовать, если излучение накачки в пространстве взаимодействия с нелинейной средой обладает развитой спекл-структурой. Схема ввода излучения в кювету ВРМБ, обеспечивающая высокое качество обращения волнового фронта, представлена на рис. 4, разработана С. М. Куликовым, Г. Г. Кочемасовым, Ф. А. Стариковым, С. А. Сухаревым. В проведенных экспериментах с такой схемой ввода излучения зарегистрирована на выходе усилителя расходимость излучения $\theta_{0,5E} = 2 \cdot 10^{-5}$ рад, $\theta_{0,5J} = 6 \cdot 10^{-6}$ рад, близкая к дифракционной. Новизна научных результатов, полученных с предложенной схемой ввода, состоит в том, что удалось получить расходимость излучения на порядок меньшую, чем для тех же условий по рабочей среде лазера, линейными методами (нерезонансная обратная связь с угловым селектором).

Ряд важных предложений и изобретений был сделан применительно к разработке моноимпульсных фотодиссоционных лазеров для облучения микромишеней по проблеме лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) — установки «Искра-4», «Искра-5». Наиболее острым был вопрос об источнике световой накачки рабочей среды фотодиссоционного лазера. Световой источник должен быть многоцветным, иметь температуру свечения ~ 30000 К, достаточно прост в изготовлении и монтаже. Такой источник многоцветного действия был создан, авторское свидетельство на изобретение было выдано В. И. Шемякину и В. А. Самылину в 1973 г.

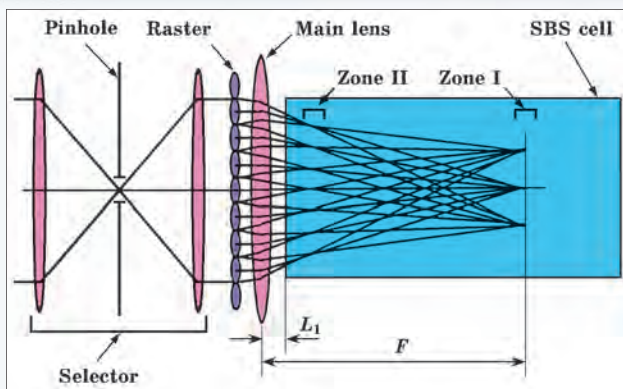


Рис. 4. Схема ввода излучения в кювету ВРМБ

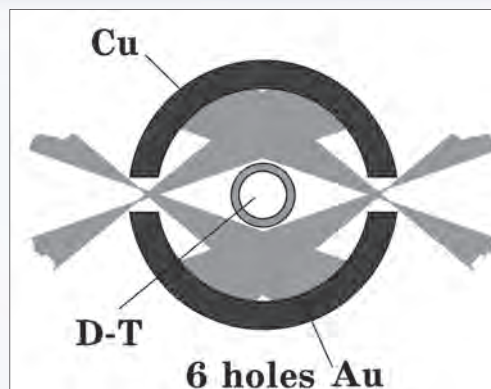


Рис. 5. Схема мишени с конвертором

Для одного из режимов облучения мишеней, содержащих Д-Т газ, требуется лазерное излучение с длительностью менее 1 нс. Такие параметры излучения были реализованы на установке «Искра-4» при выполнении следующих условий: повысить сигнал на входе оконечного усилителя до энергии насыщения; добиться однородности в прокачке рабочего вещества; сократить передний фронт импульса на входе усилителя. При выполнении этих условий на установке «Искра-4» был получен лазерный импульс длительностью 0,1 нс и мощностью излучения 10 Твт.

Удобным инструментом для экспериментального исследования физических процессов, протекающих в высокотемпературной плазме, является мишень с обращенной короной, предложенная В. Г. Рогачевым. Она представляет собой сферическую оболочку, внутренняя поверхность которой покрывается слоем вещества, содержащим D_2 и T_2 . Лазерное излучение освещает внутреннюю поверхность сферы через отверстия в оболочке. Под действием излучения испаряется тонкий слой вещества и формируется корона, движущаяся к центру мишени. При торможении вещества в центре мишени образуется высокотемпературная плазма. Ионная температура достигает ~ 20 кэВ при введенной лазерной энергии ~ 2000 Дж, а нейтронный выход $\sim 10^{10}$ нейтронов за импульс.

Обеспечение высокой симметрии облучения термоядерной мишени — ключевая проблема ЛТС. Один из вариантов ее решения, наиболее обнадеживающий, — облучение мишени, содержащей Д-Т, рентгеновским излучением за счет преобразования лазерного излучения в рентгеновское на стенках кожуха-конвертора. Г. Г. Кочемасовым и Л. С. Мхитарьяном предложен сферический кожух-конвертор, в центре которого расположена мишень, содержащая Д-Т. Схема

такой мишени представлена на рис. 5. Конвертор позволяет получить неоднородность облучения центральной капсулы менее 3%. Высказанная идея дала возможность провести исследования по актуальным вопросам ЛТС — влиянию асимметрии облучения, асимметрии оболочки на степень сжатия Д-Т газа, генерации быстрых ионов и др. Проведенные эксперименты показали возможность получения высокотемпературной плотной плазмы и исследования ее свойств в условиях непрямого рентгеновского облучения микросферы.

Для проведения физических измерений в различного рода опытах сотрудниками отделов А. В. Бессараба, В. М. Муругова, Э. Н. Пащенко были разработаны методики и аппаратура для измерения параметров лазерного, рентгеновского излучения, потоков нейтронов, быстрых ионов, скоростей движения микросфер и других. Следует отметить методику В. М. Муругова, С. Н. Петрова, А. В. Сеника, Н. Ф. Жмулева, которая позволяет дистанционно регистрировать рентгеновское излучение источника. Данная методика позволяет измерять длительность импульса с фронтом нарастания $\sim 0,1$ нс. Первичная регистрация производится с помощью ЭОП, а далее с помощью ПЗС матрицы идет достаточно медленное считывание с экрана ЭОПа и передача сигнала в пункт приема информации.

Конечно, еще много полезного, яркого, интересного можно рассказать о научных предложениях, достижениях сотрудников ИЛФИ. Это — только вершина айсберга.

КИРИЛЛОВ Геннадий Алексеевич — директор ИЛФИ (1982–2004 гг.) (ныне — главный научный сотрудник), доктор физ.-мат. наук, лауреат Государственной премии