

Мегаджоульный лазер

Б. А. ВЫСКУБЕНКО

С момента первого получения Майманом лазерной генерации в 1961 г. до начала исследований лазеров во ВНИИЭФ прошло всего 4 года. Но за это время в печати были опубликованы многочисленные работы, в которых описаны факты получения лазерной генерации с применением различных источников накачки: электрического разряда, мощного светового импульса, равновесного нагрева с последующим газодинамическим расширением, химических реакций. Энергетические характеристики, приведенные в этих первых работах, как правило, не вызывали оптимизма. По этим данным трудно было судить о перспективности применения того или иного варианта лазера в технологии или военном деле. В первую очередь были неизвестны достижимые в оптимальных условиях КПД и удельные энергетические характеристики – выходная энергия и мощность, отнесенные к расходам веществ, а также к объему и весу лазерного устройства. Без знания этих характеристик невозможно оценить вес, размеры и стоимость эксплуатации лазера для военных и технологических применений. Был также неизвестен механизм взаимодействия излучения различной плотности мощности с веществом, без чего не определить параметры лазерного воздействия на различные объекты военной техники, достаточные для выведения их из строя. Все это предстояло определить. Для этого в первую очередь необходимо было создать лазеры с высокой мощностью и энергией выходного излучения.

В числе публикаций тех лет были работы, в которых исследовались газовые лазеры со световой накачкой. В одном из вариантов таких лазеров мощное ультрафиолетовое излучение вызывало диссоциацию молекул, в результате которой появлялись возбужденные частицы с инверсией населенностей. В частности, в работах ученых ФИАН (г. Москва) была показана перспективность некоторых йодных соединений, в которых в результате фотодиссоциации образовывался атом йода с возбужденным первым электронным уровнем, который затем при переходе в основное состояние излучал квант с длиной волны 1,315 мкм.

Примерно в это же время появилась публикация с описанием лазера, в котором инверсия населенностей получалась в результате облучения (накачки) кристалла рубина светом от ударной волны в аргоне, и, тем самым, была продемонстрирована возможность использования для накачки лазера энергии взрывчатых веществ (ВВ). Это открывало перспективы увеличения энергии и мощности выходного излучения. Активное включение в решение этой проблемы ВНИИЭФ, в совершенстве владевшего взрывными технологиями, было вполне естественным. И в середине 1960-х гг. исследование лазера, в котором накачка осуществлялась путем диссоциации йодных соединений при облучении светом ударной волны (УВ) от взрыва заряда ВВ, было инициировано во ВНИИЭФ академиками Ю. Б. Харитоновым – научным руководителем ВНИИЭФ в те годы, и Н. Г. Басовым – директором ФИАН. Руководство этими работами было поручено С. Б. Кормеру, возглавлявшему в те годы отдел 24 сектора 3. Накануне этих событий в отделе группой М. В. Сеницына были проведены исследования температуры и светимости фронта УВ в благородных газах: аргоне, криптоне, ксеноне, что оказалось весьма кстати для нового направления работ. Так во ВНИИЭФ начались работы по созданию и исследованию фотодиссоциационных лазеров (ФДЛ). Совместно с сотрудниками ФИАН группы Г. А. Кириллова и М. В. Сеницына провели во ВНИИЭФ экспериментальные исследования ФДЛ. Работа была проведена под руководством С. Б. Кормера при постоянном внимании и поддержке академика Ю. Б. Харитона и главного конструктора ВНИИЭФ Е. А. Негина. Расчетно-теоретические исследования, которые шли параллельно с экспериментами, проводились в лаборатории В. Д. Урлина и в ФИАНе.

Поскольку в опубликованных лазерных экспериментах с диссоциацией йодидов лампы-вспышки окружали рабочее вещество, расположенное в кварцевой кювете, то, по аналогии, в первых взрывных лазерных опытах рабочее вещество также помещалось в кварцевую трубку. Трубка размещалась по оси специально создан-

ного цилиндрического заряда, внутрь которого напускался ксенон. Этот тип устройства назывался «кварцевый» вариант. Полный цилиндрический заряд инициировался по наружной поверхности, и после детонации получалась ударная волна в ксеноне, сходящаяся к оси цилиндра, где и находилось рабочее вещество в кварцевой трубке. Я не знаю, кто первый обратил внимание на важный факт: лазерная генерация продолжалась и тогда, когда ударная волна, пройдя через стенку кварцевой трубки, шла по рабочей смеси. Но этот факт лег в основу так называемого «гомогенного» варианта, в котором с самого начала ударная волна распространялась по смеси рабочих йодидов с ксеноном (в ксеноне ударная волна имеет наибольшую температуру фронта). В «гомогенном» варианте в полной мере проявилась возможность масштабирования ФДЛ до высоких значений энергии и мощности. Инверсные свойства рабочей среды исследовались в ФИАН с накачкой лампами-вспышками и взрывом проволоки, а также во ВНИИЭФ, где для этих целей был разработан специальный так называемый «сходящийся» заряд. Рабочая смесь накачивалась светом фронта сходящейся к оси ударной волны от цилиндрического заряда. В этих экспериментах, проводимых под руководством Г. А. Кириллова группой С. А. Сухарева, была получена среди других данных важная информация об оптимальном составе и о возможности масштабирования ФДЛ при увеличении активной длины лазера. Примерно в это же время в лаборатории М. В. Сеницына группой В. Т. Пунина были проведены исследования яркостной температуры фронта УВ в воздухе и в ксеноне для различных типов зарядов: плоского и цилиндрических «сходящегося» и «расходящегося». «Расходящийся» заряд – это цилиндрический заряд, который инициировался по оси и создавал цилиндрическую расходящуюся УВ. Этому, конечно, предшествовала первичная конструкторская разработка такого заряда, выполненная Б. Е. Кодолой. Были проведены также опыты с лазерной генерацией с использованием «расходящегося» заряда. На основании этих опытов и данных измерений яркостной температуры фронта УВ для разработки мощного лазера был принят «расходящийся» вариант, как наиболее экономичный. В этом варианте заряд помещался по оси цилиндрической бочки, которая наполнялась смесью йодида с ксеноном, а на торцах бочки были зеркала лазерного резонатора.

Создание лазера с высокой энергией и мощностью потребовало разработки заряда ВВ, удов-

летворяющего жестким специфичным требованиям. Локальные отклонения фронта ударной волны от идеального цилиндра не должны превышать несколько миллиметров, что при многоточечном инициировании представляло непростую задачу. Созданные ранее первые конструкции заряда этим требованиям не отвечали. Под руководством Г. А. Кириллова эта задача была решена в группе В. А. Голубева при непосредственном участии автора этих строк. Одной из новых была проблема одновременного инициирования большого числа электродетонаторов (ЭД). Эта задача решалась группой В. М. Муругова. К этому времени в пользу безопасности полностью отказались от детонаторов, начиненных высокочувствительным инициирующим ВВ. Были разработаны безопасные детонаторы Д-22 и несколько модификаций на их основе. Для их инициирования требовалась высокая крутизна токового импульса. А для одновременного инициирования большого числа ЭД требования к крутизне фронта импульса тока были очень жесткими. В. М. Муруговым с А. М. Андреевым была разработана система, включавшая 5 высоковольтных установок ВУ-19, которая позволяла инициировать 2000 ЭД с разновременностью не более 0,15 мкс. Установки ВУ-19 были созданы ранее в секторе 3. Контрольные опыты, проведенные в нашей группе, подтвердили заданную одновременность срабатывания отдельной цепочки из 50 ЭД. Полная отработка заряда была проведена рука об руку вместе с конструкторами: В. И. Ткачевым, Г. Г. Кузминым, К. Головкиным, В. Г. Колесниковым, которые тогда входили в отдел П. Д. Ишкова в секторе 5. В результате этой большой работы был сконструирован цилиндрический заряд, создававший непосредственно в рабочей газовой смеси расходящуюся от оси ударную волну почти идеальной цилиндрической формы. В прилегающем к УВ слое среды, под влиянием мощного ультрафиолетового облучения диссоциировали йодные соединения с образованием атомов возбужденного йода, которые в лазерном резонаторе излучали энергию в ближней инфракрасной области спектра. Толщина слоя с инверсной средой была невелика, поэтому УВ должна иметь минимальные отклонения от идеального цилиндра. По этой же причине требовалась точная юстировка заряда по отношению к зеркалам. Конструкторами были созданы элементы подвески, которые позволяли 3-метровый заряд с весом 200 кг подвесить по оси цилиндрического корпуса лазера с нужной точностью.

Автору этих строк посчастливилось участвовать в экспериментах с ФДЛ такого типа на всех этапах его исследований в качестве взрывника, на котором кроме всех работ с зарядом была ответственность за вакуумирование корпуса, юстировку резонатора и методик измерений фронта УВ, ближней зоны генерации и прочее...

Созданию «большой бочки» (так на нашем жаргоне называли ФДЛ с корпусом диаметром 1,3 м) предшествовали экспериментальные исследования, выполненные в лабораториях Г. А. Кириллова и М. В. Сеницына на ФДЛ с корпусом диаметром 0,65 м («малая бочка»). Первые эксперименты с «большой бочкой» были сделаны с резонатором диаметром 0,44 м, который на порядок дешевле полноразмерного резонатора с диаметром зеркал 1,3 м. В этих экспериментах была проверена конструкция всей этой версии ФДЛ с подвеской заряда и системой юстировки. Кроме того, было показано, что генерация эффективно продолжается и на базах движения УВ более 0,7 м, несмотря на снижение яркостной температуры фронта УВ, что показало возможность увеличения полной энергии с увеличением диаметра корпуса ФДЛ.

И вот, наконец, решающий эксперимент с полным резонатором. Здесь следует сказать несколько слов об обстановке, царившей на этих опытах. Опыт готовился несколько дней, работали в две, а то и в три смены. По технике безопасности взрывник не должен работать больше одной смены (8 часов) в сутки. Поэтому ведущие сотрудники (которые как раз и были взрывниками) с утра работали как обычные сотрудники, прописанные в задании на проведение работ, а вечером уже в качестве взрывников, или наоборот. Юстировочные работы можно было проводить только ночью, поскольку днем не увидеть отраженные лучи от юстировочного лазера. Схемы измерений были достаточно сложными, с большим количеством ответвлений, поэтому луч от юстировочного лазера в конце каждой ветки был очень слабым. Нужно было кроме чисто лазерных параметров – энергии и мощности генерации – снять на киноплёнку движение ударной волны, движение зоны генерации.

Василий Матвеевич Муругов вошел в группу измерителей и возглавил ее как раз перед опытами с «большими бочками». Он стал ответственным за измерения энергии и мощности излучения. Вместе с командой измерителей и вместе с фиановцами занимался и разработкой методик. В те времена не было мощных лазеров, а потому не было и методик измерений их параметров,

их требовалось создать. С приходом Василия Матвеевича им был введен полигонный порядок в организации заключительных процедур проведения опытов. Некоторые новые приборы не были достаточно отработаны и требовали строго определенного времени на прогрев. Поэтому введение жесткого регламента на заключительные процедуры подготовки измерений и проведения опыта существенно повысило надежность измерений. Часть измерительных приборов располагалась в каземате, часть на поле. Излучение от ФДЛ фокусировалось линзой для уменьшения диаметра пучка на амбразуре каземата, и заводилось внутрь каземата, где были основные методики, а часть излучения отводилась пластинами на рассеивающий экран (большой лист ватмана) и от него регистрировалась фотодиодами. Эта методика была как вспомогательная, но позднее она встала в ряд основных. Ее отработывали сотрудники ФИАН (Красовский и Архипов). Поэтому естественное название ее было «КРАХ» (!), (ну что там, крахи готовы?).

На финальной части подготовки опыта и в момент его проведения в каземате собиралось до 30 человек. Обстановка на опытах была достаточно демократичной. С. Б. Кормер (далее, для краткости, С.Б.) присутствовал на всех лазерных опытах. Сейчас мы знаем, что это направление работ шло далеко не по зеленой улице. Были противники и в институте и в министерстве. Опыты были довольно дорогостоящими, поэтому на С.Б. лежала большая ответственность. Нельзя было допустить опыты с нулевым результатом. Мы тогда по молодости не задумывались над этим, хотя обстановка ответственности за свои действия принималась каждым из нас как совершенно естественная. Поэтому ко времени проведения опыта (это к четырем-пяти часам утра) общее напряжение заметно нарастало. Прошла команда убрать все лишнее с поля. Утащили вакуумные насосы, баллоны с рабочими газами, электроприборы. Заодно по ошибке утащили в каземат и автоколлиматор, который стоял на подставке перед выходным зеркалом ФДЛ, и которым я регулярно проверял параллельность зеркал. Проверки были необходимы, поскольку температура окружающего воздуха заметно менялась, а это могло привести к разъюстировке. Перед самым опытом необходимо было быстро проверить юстировку, а установка автоколлиматора в прежнее место занимает какое-то время. А уже объявлена 5-минутная готовность! Чертыхаясь, тащу автоколлиматор на поле. Подходит В. А. Катулин – сотрудник

ФИАН: «Дай-ка мне». Берет автоколлиматор на руку и прямо с руки наводит на зеркала: «Ну вот, все в порядке! Стойку стрелял?». – «Стрелял». – «Вот и держи, как винтовку, тебе же нужно только совмещение крестиков увидеть». Действительно, вижу, что резонатор нормально съюстирован. Вообще надо отдать должное команде фиановцев, а особенно Виктору Анатольевичу Катулину. Он всегда оказывался в нужном месте, где возникала какая-нибудь проблема, и мгновенно решал ее. У него к этому времени был уже богатый опыт в лазерном эксперименте, и он щедро передавал его нам.

И вот, наконец, все юстировки, запуски аппаратуры, линии высокого напряжения проверены. Экраны люминофоров засвечены ультрафиолетовой лампой и вставлены в фоторегистраторы (это – методика измерения временной формы луча в ближней и дальней зонах генерации), взят второй сигнал. Взрывные опыты проводятся с двумя сигналами – после первого никто, кроме взрывника и помощника, не имеет права выходить из каземата, проводится подсоединение подрывных магистралей. Второй сигнал дается уже после подсоединения капсюлей-детонаторов, и весь персонал находится в каземате, и каземат заперт. Мы сидим в измерительном отсеке каземата. Перед нами на листе фанеры стоят гальванометры калориметров, измеряющих энергию излучения. Фанера висит на резиновых шнурах, подвешенных к потолку для устранения влияния тряски после взрыва на показания стрелок гальванометров.

Каждый смотрит на свой прибор. Нужно зафиксировать максимальное быстрое отклонение стрелок. Чем оно больше, тем больше выходная энергия ФДЛ. С.Б. сидит рядом, справа от меня в тесном углу.

– Сколько делений будет, если все штатно?

– В районе пятидесяти.

Здесь надо вспомнить, что С.Б. в это время было уже 46–47 лет, и нужно было иметь хорошее здоровье, чтобы выдерживать эти ночные довольно нервные бдения после полного трудового дня. Итак, завывли моторы фоторегистраторов, на пультах управления СФР выставлена синхронизация и... взрыв! Стрелка гальванометра качнулась вправо и... остановилась на 4–5 делениях. Лицо С.Б. стало серым, и он буквально осел в углу. Мне было некогда – нужно было срочно фотографировать люминофоры, пока изображения не расплылись, и я побежал в основной отсек каземата. Там сильно пахло продуктами взрыва. Этого не должно было быть, потому

что амбразуры каземата закрыты стеклянными блокпакетами. Блокпакет – это три стеклянных пластины толщиной 5 см, с просветляющим покрытием. Занимаясь своими делами, слышу, что кто-то кричит: «Ребята, блокпакет осколком разбит!». Это означает, что не сработала защита амбразуры. А это уже по моей части! Побежал к лобовой стене каземата, вижу, что заслонка сработала – она захлопывалась от взрыва небольшого дополнительного заряда. Осколка в амбразуре не должно было быть! Что же произошло? И что же это за осколок, который последовательно пробил все три стекла блокпакета? Захожу в центральный отсек. В центре блокпакета дыра, обрамленная мелкими осколками стекла с расходящимися трещинами. Осколка, который пробил блокпакет, нет. И тут кто-то из фиановцев, по-моему, В. А. Катулин заметил: «Да тут же лучевой ожог на стекле вокруг дыры! Это излучением разбило стекла блокпакета!». И тут сразу появился С.Б., лицо у него порозовело – излучение-то было мощным! А разрушение блокпакета означало, что только часть энергии излучения попала на измерительные приборы, ее калориметры и зафиксировали! С.Б. полез к амбразуре, задевая своей грузной фигурой приборы, отводящие пластины оптической схемы. Убедился, что это разрушение от луча. Тут же нетерпеливо:

– Муругов, так что? Энергию не определить?

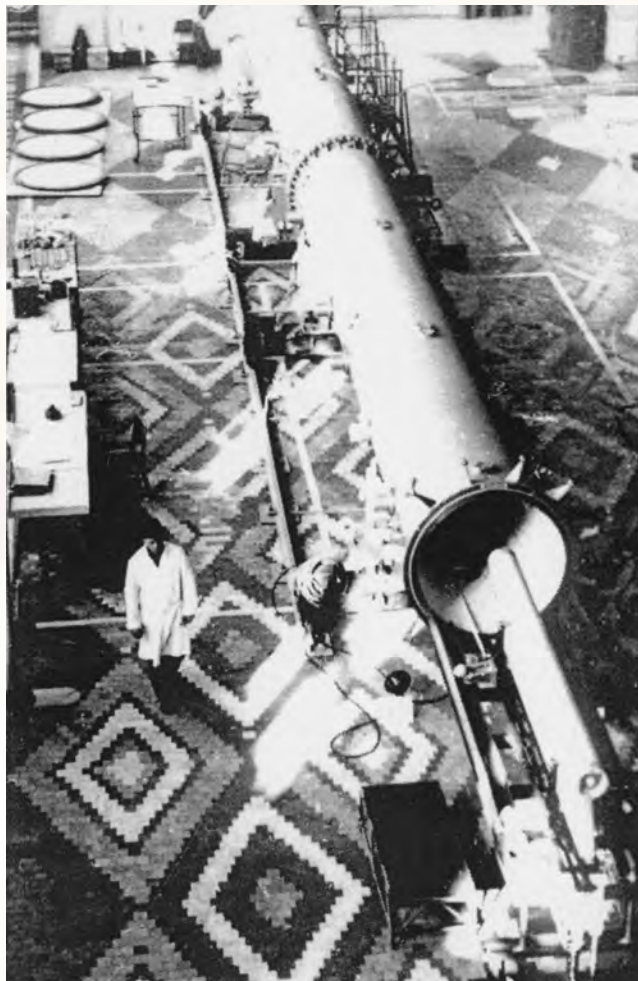
– Ну почему? Надо обработать КРАХов, проявить все пленки...

– Так проявляйте!!!

В этом был весь Кормер. На часах 4:30. Проявить пленки можно было только в фотолаборатории в секторе после восьми утра. Но его это не устраивало! Нужно было немедленно знать, соответствует ли энергия полученного излучения ожидаемой! Последующая обработка всех результатов измерений показала, что энергия соответствовала расчетной – 10^5 Дж, а мощность – 10^9 Вт. А на этом разбитом блокпакете мы впервые тогда реально почувствовали, что такое мощное лазерное излучение, и в последующих опытах прямое излучение уже подавалось на мишень, где изучалось взаимодействие излучения с различными материалами, а энергия и мощность определялись по ослабленному лучу. Занималась проблемами взаимодействия излучения с материалами лаборатория А. И. Фунтикова. В его команде были А. В. Бессараб, Д. В. Павлов, Ю. Д. Богуненко и другие.

Следующим шагом в разработке взрывных ФДЛ (ВФДЛ) были эксперименты сначала с 3-мя

соединенными «большими бочками», а потом с 10-ю. Нужно было понять, сохранится ли линейность роста энергии и мощности с увеличением длины лазера. Кроме того, было очень заманчиво получить луч с магическим значением энергии 1 МДж, и посмотреть, что таким лучом можно реально сделать. Такой эксперимент был проведен. Для его проведения потребовалось решить проблему одновременного инициирования 2000 ЭД. Как это было сделано, сказано выше. Кроме того, в экспериментах с 3-мя и с 10-ю «большими бочками» использовались одновременно 3-и фоторегистратора. Записывались во времени форма излучения в ближней и дальней зонах генерации, а также снималось кино взаимодействия излучения с мишенью. Не буду описывать подробности. Все прошло штатно, и мы действительно получили в излучении около 1 МДж при мощности почти 10^{10} Вт. Надо сказать, что лазерного излучения такой мощности и энергии в то время не было ни у кого в ми-



Фрагмент сборки генератора Ф-1200

ре. При изучении взаимодействия излучения с материалом был впервые получен эффект, который впоследствии назвали «световой детонацией», когда излучение поглощается продуктами испарения мишени, в продуктах навстречу излучению распространяется ударная волна, и излучение не доходит до поверхности.

Следующей разработкой ВФДЛ стал так называемый «мобильный» вариант, то есть нужно было создать перевозимую модель, которую можно было доставить на место испытаний в собранном виде. Для корпуса такого варианта была выбрана труба, которую в большом количестве выпускала наша промышленность для газопроводов. Диаметр ее был 1,2 м. Поэтому эта конструкция называлась «Ф-1200», в отличие от первоначального варианта «Ф-1300».

Пришлось пожертвовать небольшим уменьшением выходной энергии в пользу удешевления конструкции. Конструкторским отделом В. И. Ткачева была разработана новая конструкция ФДЛ. Полностью изменена конструкция подвески заряда. Заряд должен был выдерживать перегрузки при перевозке. Это потребовало проведения взрывных опытов по отработке элементов новой конструкции крепления заряда в корпусе ФДЛ. Такие работы были проведены в моей группе взрывниками В. И. Ефремовым и Е. Т. Деменюком с Н. Е. Козловым. Длина «Ф-1200» была 20 м. По оси трубы размещались шесть трехметровых зарядов, аналогично, как и в «Ф-1300». Вариант «Ф-1200» был изготовлен, и были проведены транспортные испытания. После этого конструкция была доставлена на место испытания и успешно испытана. Были получены расчетные значения энергии и мощности. Таким образом, был создан перевозимый ВФДЛ с выходной энергией около 500 кДж и мощностью 6×10^9 Вт. В дальнейшем на базе этих разработок были проведены исследования, направленные на уменьшение расходимости выходного излучения. Но это уже отдельный рассказ с другими действующими лицами.

Через 30 лет, в 1998 г., результаты опытов с ВФДЛ лазерами были доложены автором на международной конференции в Санкт-Петербурге «XII International Symposium on Gas Flow and chemical Lasers and High Power Laser Conference» и вызвали большой интерес у международной научной общественности.

ВЫСКУБЕНКО Борис Александрович –
ведущий научный сотрудник ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ,
кандидат физ.-мат. наук