

Мощные импульсные CO₂-лазеры высокого давления и их применения

Г.А.Баранов, А.А.Кучинский

Статья посвящена проблемам, возникающим при создании мощных импульсных CO₂-лазеров и усилителей высокого давления, а также анализу возможных путей их решения. Рассмотрены перспективы развития таких лазеров и их применение в технологических процессах. Представлены результаты оригинальных разработок лазерного комплекса для получения изотопа углерода-13 и CO₂-усилителя сверхатмосферного давления.

Ключевые слова: CO₂-лазер, рентгеновский предыонизатор, генератор импульсных напряжений, лазерное ускорение электронов, лазерное разделение изотопов, технологические применения.

1. Введение

В последние годы в мировом научном сообществе наблюдается повышенный интерес к использованию мощных импульсных CO₂-лазеров сверхатмосферного давления для решения ряда фундаментальных физических проблем, таких как ускорение заряженных частиц световой волной и создание высокоярких источников когерентного рентгеновского излучения. Разработка мощных (более 1 ТВт) пикосекундных лазерных систем на длине волны 10 мкм открывает и другие, ранее недоступные применения лазерного излучения, например:

- генерация пикосекундных импульсов рентгеновского излучения в лазерной плазме для использования в рентгеновской микролитографии и микроскопии;
- формирование многозарядных ионов в лазерной плазме для их последующего накопления и использования в схемах ускорителей типа «Суперколлайдер»;
- управляемые лазером разряды и формирование молниепровода;
- нелинейное распространение лазерного излучения (туннельный эффект и эффект Керра);
- воздействие на биологические объекты и применение в медицине;
- мод-селективная лазерохимия;
- исследование возбуждения молекул фазомодулированными сверхкороткими импульсами;
- исследование электрон-фононного энергообмена при взаимодействии лазерного излучения с твёрдыми мишенями, лазерное ускорение твёрдых тел;
- исследование электромагнитных полей и токов, генерируемых в пикосекундной лазерной плазме.

Сразу оговоримся, что, используя термин «лазер высокого давления», мы будем иметь в виду CO₂-лазер с на-

качкой объёмным самостоятельным разрядом и давлением активной среды свыше 0.5 атм, т. е. в той области плотности газа, где не может быть реализован непрерывный объёмный самостоятельный разряд. Кроме того, анализ поставленных проблем будет производиться в основном лишь на основе результатов, полученных в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова и в институтах, в разное время сотрудничавших с НИИЭФА. В данной работе осуществлён анализ состояния разработок и применений импульсных CO₂-лазеров высокой мощности. Кроме того, представлены результаты оригинальных разработок лазерного комплекса для производства изотопа углерода-13 и CO₂-усилителя сверхатмосферного давления.

2. Широкоапертурные CO₂-лазеры атмосферного давления

Первые успехи, достигнутые в повышении энергии лазерного излучения CO₂-лазеров атмосферного давления с поперечной накачкой (ТЕА лазеров), связаны с увеличением апертуры систем накачки (длина усиливающей среды ограничена лучевой прочностью оптических элементов и не превышает 1 м). В России это направление интенсивно развивалось в ТРИНИТИ [1, 2], НПО «Астрофизика» [3, 4], ИОФРАНе [5–10], НИИ высоких напряжений при Томском политехническом институте [11, 12], РФЯЦ ВНИИЭФ [13] и НИИЭФА [14–17].

Было показано, что основное препятствие, возникающее при увеличении межэлектродных зазоров, заключается в снижении устойчивости объёмного разряда в результате сильного поглощения УФ излучения в рабочей смеси. При использовании традиционного метода возбуждения рабочей среды лазера межэлектродный зазор обычно не превышает 10–15 см. Поэтому под термином «широкоапертурный CO₂-лазер» принято иметь в виду CO₂-лазер (усилитель) с апертурой площадью более 100 см².

Напомним, что традиционный метод возбуждения среды требует выполнения двух необходимых условий: создания минимальной начальной концентрации электронов N_0 во всём активном объёме и максимально быстрого подъёма напряжения до значения, превышающего

Г.А.Баранов, А.А.Кучинский. Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В.Ефремова», Россия, 196641 С.-Петербург, пос. Металлострой; e-mail: laser@mail.rcom.ru

Поступила в редакцию 25 августа 2004 г., после доработки – 1 декабря 2004 г.

статическое пробивное напряжение. Кроме того, необходимо обеспечить максимальную однородность напряжённости электрического поля в разрядном промежутке лазера (проблема профилирования электродов). При увеличении межэлектродного зазора (или давления газа) выполнить эти условия технически крайне сложно. Тем не менее первые успехи в создании лазеров с апертурой площадью более 100 см² были достигнуты именно благодаря техническому исполнению основных узлов систем накачки лазеров (тщательное профилирование электродов, использование многоканальных искровых УФ излучателей, применение малоиндуктивных генераторов импульсных напряжений и т. п.).

В начале 1980-х годов появились первые предложения по использованию мягкого рентгеновского излучения для решения проблем дальнего действия и однородности предварительной ионизации газовых сред в эксимерных средах (под дальним действием следует понимать максимальное расстояние от источника излучения, при котором концентрация электронов предыонизации превышает заданный уровень) [18, 19]. По сравнению с предыонизаторами, использующими электронный пучок или УФ излучение, рентгеновский предыонизатор обладает следующими преимуществами: высокой проникающей способностью, небольшим рабочим напряжением рентгеновского источника и, следовательно, отсутствием биологической защиты, а также возможностью использования выходного окна значительной толщины.

С точки зрения конструктивной простоты и надёжности рентгеновский предыонизатор занимает промежуточное положение между УФ излучателем и источником пучка высокоэнергетических электронов.

Мягкое рентгеновское излучение было использовано для предыонизации в ТЕА СО₂-лазерах с межэлектродным зазором 20 см [20, 16] и в СО₂-лазере повышенного (4 атм) давления [21]. Во всех случаях применялась традиционная схема возбуждения разряда с предыонизацией коротким (~ 100 нс) импульсом рентгеновского излучения. Прямое сравнение разрядных характеристик в случае УФ и рентгеновского предыонизаторов, проведённое в работе [17], показало, что использование рентгеновского излучения позволяет несколько увеличить процентное содержание активных молекул в газовой смеси и величину межэлектродного зазора. При этом удельные характеристики лазера практически не изменяются. В работе [17] показано, что применение рентгеновского излучения вместо УФ предыонизации позволило увеличить межэлектродный зазор до 22 см и реализовать объёмный разряд с содержанием молекулярных газов до 40 % без добавления легкоионизируемых примесей.

В работах [6, 7] развит иной подход к проблеме формирования объёмного самостоятельного разряда. Суть его заключается в том, что необходимые начальные условия в разрядной области реализуются в результате её предварительного дрейфового заполнения электронами, производимыми внешним источником ионизации в прикатодной области разрядного промежутка. В этом случае существенное снижение требований как к дальности действия источника ионизации, так и к длительности фронта напряжения возможно при выполнении следующих условий. Во-первых, время жизни свободных электронов должно быть достаточным для дрейфового заполнения разрядной области. Во-вторых, источник прикатодной ионизации должен работать в течение всей фазы форми-

рования разряда. Требования к форме электродов при этом значительно снижаются. Возможность формирования объёмного разряда в такой «остроугольной» геометрии обусловлена тем, что в процессе заполнения разрядного промежутка электронами электрическое поле благодаря возникновению отрицательного объёмного заряда многократно снижается на катоде и усиливается на аноде (по отношению к своему среднему по промежутку значению). Из-за расталкивания электронов в потоке максимальное усиление поля достигается в центральной области анода. Поэтому именно здесь, а не вблизи острого края катода, начинают развиваться ионизационные процессы. При этом напряжение на разрядном промежутке не должно нарастать слишком быстро, т. к. в противном случае концентрация электронов не успевает отслеживать изменение внешнего поля и экранирование края катода оказывается неэффективным. Дальнейшее развитие этого принципа позволило разработать устройства накачки ТЕА СО₂-лазеров с межэлектродным зазором 60 см [8, 9].

3. СО₂-усилители сверхатмосферного давления

В последнее время проявляется повышенный интерес к сверхмощным пикосекундным лазерным системам в ИК области спектра, в том числе к СО₂-лазерным системам. Создание сверхмощных лазерных систем с ультракороткой длительностью импульсов (от нано- до пикосекунд) во многом стимулировалось развитием работ по лазерному управляемому термоядерному синтезу. В результате конкуренции нескольких возможных подходов к решению этой проблемы с использованием различных типов лазеров наибольшее развитие получили твёрдотельные лазерные системы с длиной волны 1.06 мкм и менее.

Существенно меньшее развитие получили пикосекундные СО₂-лазерные системы 10-микрометрового диапазона, которые по ряду причин оказались менее эффективными с точки зрения нагрева термоядерных мишеней. Однако существует целый ряд фундаментальных физических задач в области взаимодействия сверхмощного лазерного излучения с веществом, при решении которых ожидаемый эффект в случае фиксированной интенсивности лазерного излучения существенно возрастает с увеличением его длины волны. В качестве примера можно привести лазерное ускорение электронов, при котором относительное приращение энергии электрона после взаимодействия с лазерным полем, усреднённое по ступке электронов, возрастает с увеличением длины волны лазерного излучения как λ^2 . Оценки показывают, что при длительности светового импульса ~ 10 пс и мощности излучения 1 ТВт ускоряющий градиент оказывается равным ~ 1 ГэВ/м, что существенно больше, чем в современных линейных ускорителях (до 100 МэВ/м). Указанный подход может привести к созданию нового поколения ускорителей, в которых будут использоваться нетрадиционные методы ускорения заряженных частиц.

Из доступной литературы следует, что в настоящее время в мире существуют три крупные действующие установки среднего ИК диапазона, находящиеся в разной степени готовности.

Установка в Брукхэвской национальной лаборатории (США) предназначена для генерации одиночного ла-

зерного импульса длительностью ~ 10 пс и энергией до 30 Дж (пиковая мощность 3 ТВт) [22]. Импульс излучения планируется использовать для экспериментов по лазерному ускорению электронов. Установка содержит задающий генератор, восьмипроходный мультиизотопный предусилитель (площадь апертуры 5 см^2 , давление рабочей смеси 5 атм) и выходной трёхпроходный усилитель (площадь апертуры 80 см^2 , давление 10 атм). Оконечный усилитель находится в стадии запуска.

Установка в Калифорнийском университете в Лос-Анджелесе предназначена для генерации одиночного двухволнового (с настройкой на произвольную пару линий из спектра генерации CO₂-лазера) импульса с энергией 170 Дж и длительностью 160 пс (пиковая мощность 1.1 ТВт) [23]. Импульс излучения планируется использовать для исследования ускорения электронов в плазме (так называемая схема beat-wave). Установка находится в рабочем состоянии.

Установка в ИОФРАНе (Москва) (создана совместно с НИИЭФА им. Д.В.Ефремова) генерирует пуг импульсов длительностью ~ 150 пс с полной энергией ~ 20 Дж и предназначена для изучения взаимодействия лазерного излучения с веществом [24].

В Японии (Лаборатория физики высоких энергий) разрабатывается проект генерирования мощного пучка гамма-лучей путём обратноподнаправленного комптоновского рассеяния импульсов пикосекундного 10-микрометрового лазера на релятивистском электронном пучке [25]. Гамма-излучение планируется применять для получения поляризованного электронного пучка в японском линейном коллайдере.

Все установки построены по схеме задающий генератор – усилитель, поскольку принципиальные особенности систем формирования и компрессии одиночных пикосекундных лазерных импульсов на длине волны 10 мкм ограничивают выходную энергию генератора значением $\sim 10^{-5}$ Дж. В связи с этим возникает проблема их дальнейшего усиления в $10^5 - 10^6$ раз при сохранении временных характеристик импульса. Эффективное решение такой задачи возможно только при использовании усилителей сверхатмосферного давления. Рабочее давление усилителя должно быть таким, чтобы ширина полосы усиливаемой среды соответствовала длительности усиливаемого импульса, а его апертура и энерговклад должны обеспечивать требуемую энергию, извлекаемую в одиночном импульсе или пуге импульсов (с учётом допустимой лучевой нагрузки на оптические элементы усилителя). Для полосы 10R молекулы CO₂ перекрытие отдельных вращательно-колебательных переходов за счёт их столкновительного уширения происходит при давлении ~ 10 атм. Полоса усиливаемых частот активной среды усилителя при этом возрастает до 13 см^{-1} , что даёт возможность усиливать импульсы длительностью до 1 пс.

Работы по созданию CO₂-усилителей высокого давления начались в НИИЭФА и ИОФРАНе в конце 1980-х годов и стали логическим продолжением исследований CO₂-лазеров атмосферного давления большой апертуры [7–10, 14–17].

В НИИЭФА была продемонстрирована возможность получения объёмного разряда в объёме 0.3 л при межэлектродном зазоре 4 см и давлении активной смеси до 6 атм [26]. Предыонизация газа осуществлялась рентгеновским излучением. Результаты этих исследований были положены в основу разработки усилителя высокого давления

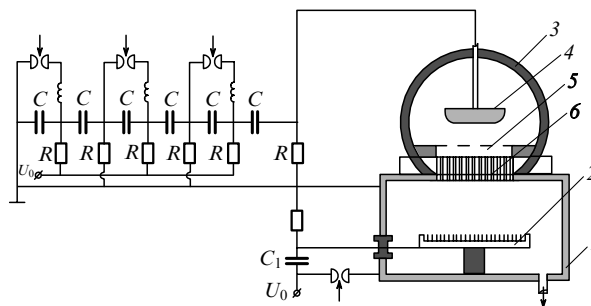


Рис.1. Схема установки:

1 – источник рентгеновского излучения; 2 – катод электронной пушки; 3 – разрядная камера; 4 – катод; 5 – анод; 6 – тормозной анод; C₁ – ёмкость основного накопителя; U₀ – зарядное напряжение.

(УВД) с геометрическими размерами разрядной области $4 \times 5 \times 55$ см.

На рис.1 представлена схема установки [27]. В качестве источника предыонизации использовался взрывоэмиссионный диод с тормозным прострельным анодом и взрывоэмиссионным катодом, изготовленным из графитовых волокон. При ускоряющем зазоре 4 см и рабочем напряжении 70 кВ полная длительность тока пушки составляла 1.5 мкс при пиковом значении тока ~ 5 кА. Источником рентгеновского излучения являлась алюминиевая фольга толщиной 50 мкм, одновременно выполняющая роль выходного окна.

Для питания разряда накачки использовался восьмиступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИН), собранный по схеме LC-генератора, с ёмкостью «в ударе» 6.25 нФ. Максимальное напряжение ГИНа на холостом ходу составляло 400 кВ. С целью сокращения времени энерговклада в разряд накачки использовался ёмкостной промежуточный накопитель (на рис.1 не показан), расположенный в непосредственной близости от разрядной камеры. «Быстрая» ёмкость была соединена с LC-генератором через индуктивность, которая предотвращала обратную перекачку энергии из промежуточного накопителя в ГИН. В ходе экспериментов было установлено, что для достижения максимальной перекачки энергии, запасённой в LC-генераторе, в нагрузку ёмкость промежуточного накопителя и фильтровая индуктивность должны быть тщательно подобраны для конкретного состава и давления активной смеси. Так, например, для смеси CO₂:N₂:He = 2:1:17 и $p = 5$ атм они составляют 12 нФ и 10 мкГн соответственно.

На рис. 2 представлены зависимости энергии генерации лазерного модуля от величины зарядного напряжения ГИНа для смеси CO₂:N₂:He = 2:1:17 в области давлений 3–5 атм. Неустойчивый телескопический резонатор с коэффициентом увеличения $M = 2$ охватывал часть активной среды объёмом 0.7 л. Неодинаковый вид зависимостей объясняется различными значениями промежуточного накопителя и развязывающей индуктивности при разных давлениях смеси. Максимальная энергия генерации (15 Дж) была получена при $p = 5$ атм и удельном энерговкладе в разряд $150 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$, что соответствует энергосъёму ~ 20 Дж/л.

В 1995 г. усилитель был перемещён в ИОФРАН и встроен в установку, предназначенную для получения импульсов излучения пикосекундной длительности. После доработки некоторых узлов усилителя и запуска задаю-

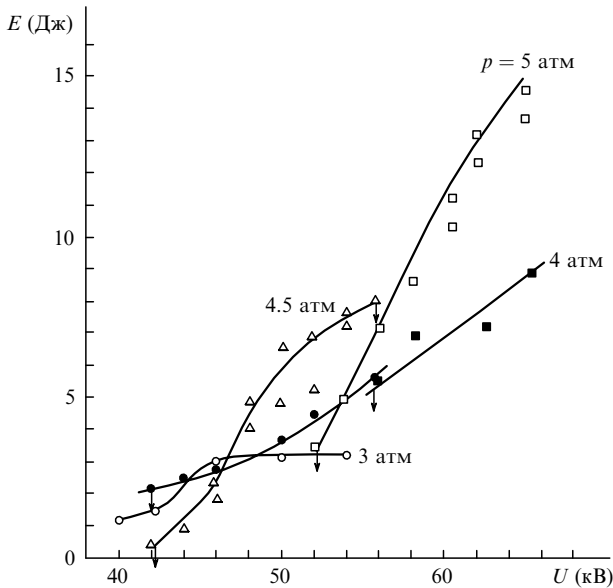


Рис.2. Зависимости энергии генерации лазерного модуля от величины зарядного напряжения для смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 2 : 1 : 17$ в области давлений 3–5 атм.

шего генератора на стенде ИОФРАН был реализован режим регенеративного усиления при давлении газовой смеси до 6 атм. Полная энергия цуга импульсов достигала 24 Дж при длительности импульсов ~ 120 пс [28].

Расчёты и экспериментальные результаты показали, что для получения импульсов пикосекундной длительности на длине волны 10 мкм с пиковой мощностью ~ 1 ТВт, необходимых для решения большой совокупности задач фундаментального и прикладного характера, необходимо создать усилитель со следующими параметрами:

- Разрядный объём (см) $(5 - 10) \times 10 \times 100$
- Межэлектродный зазор (см)..... 5–10
- Состав газовой смеси $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$
- Давление газовой смеси (атм)..... 5–10
- Содержание молекулярных газов (%) не менее 15
- Удельный энерговыход ($\text{Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$)..... не менее 100
- Коэффициент усиления слабого сигнала (см^{-1}).... не менее 0.02

При масштабировании систем накачки усилителя основная проблема заключается в увеличении индуктивности разрядной цепи источника питания и соответственно в уменьшении скорости ввода энергии в разряд накачки. Решение этой задачи возможно только при использовании промежуточного ёмкостного накопителя энергии, расположенного в непосредственной близости от разрядной камеры. В данной схеме ГИН является зарядным устройством «быстрого» накопителя. Эта идея была успешно реализована в конструкции прототипа усилителя с использованием набора малоиндуктивных конденсаторов серийного производства. Для УВД с площадью апертуры более 50 см^2 этот подход невозможен по двум причинам: во-первых, набрать батарею конденсаторов на напряжение $\sim 1 \text{ МВ}$ практически нереально, во-вторых, внешнее расположение промежуточного накопителя относительно разрядной камеры полностью не решает проблемы вследствие больших геометрических размеров камеры. Расчёты показывают, что при напряжении $\sim 1 \text{ МВ}$ и давлении активной среды ~ 10 атм разрядная камера должна быть изготовлена из металла и иметь внешний диаметр ~ 1 м. При этом сильно осложняется задача малоиндуктивного соединения внешнего промежуточно-

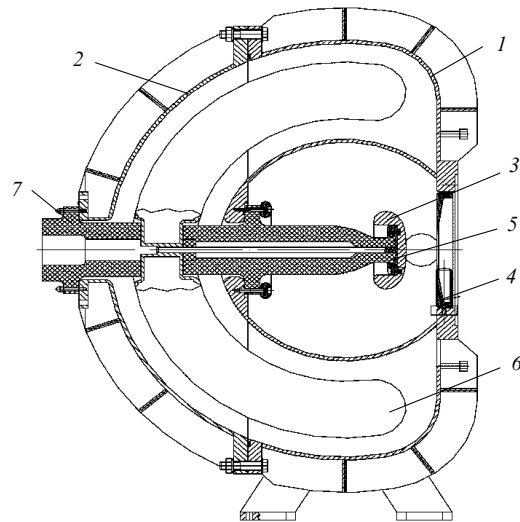


Рис.3. Конструкция разрядной камеры: 1 – внешний корпус; 2 – внутренний корпус; 3 – профилированный электрод (катод); 4 – сеточный электрод; 5 – проходной изолятор; 6 – высоковольтная обкладка водяного конденсатора; 7 – высоковольтный ввод.

го накопителя с электродной системой накачки (проблема проходных высоковольтных вводов). Для преодоления этих препятствий было предложено оригинальное техническое решение, суть которого заключается в конструктивном совмещении разрядной камеры и промежуточного накопителя – водяного конденсатора (рис.3) [29].

В настоящее время изготовлены, смонтированы и налажены рентгеновский предыонизатор, ГИН, системы газоснабжения, вакуумирования, управления и синхронизации. Параметры перечисленных узлов и систем полностью соответствуют расчётным. Кроме того, изготовлена и испытана система производства обессоленной, деионизованной дистиллированной воды, предназначенной для заполнения полости водяного конденсатора (промежуточного накопителя).

На рис.4 представлены осциллограммы тока и напряжения на рентгеновском источнике, а также сигналы с рентгеновского датчика и системы измерения концентра-

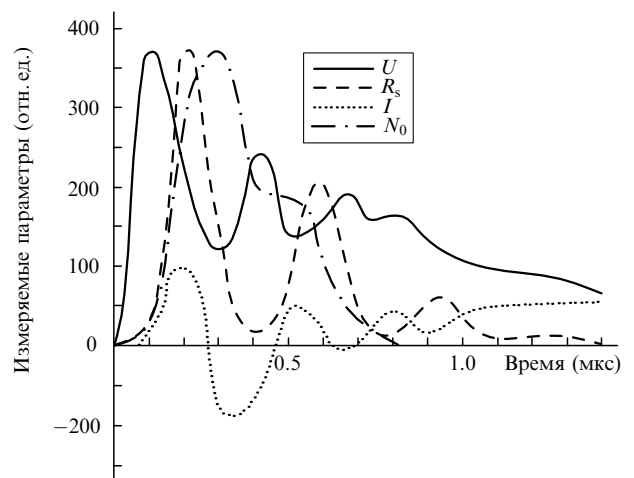


Рис.4. Осциллограммы тока I и напряжения U на рентгеновском источнике, а также сигналы R_s с рентгеновского датчика, определяющие дозу излучения, и с системы измерения концентрации электронов N_0 ; при $U = 80 - 30 \text{ кВ}$, $N_0 = (2 - 4) \times 10^8 \text{ см}^{-3}$, $I_{\text{max}} = 7 \text{ кА}$ сигнал R_s составляет 0.18 бэр/имп.

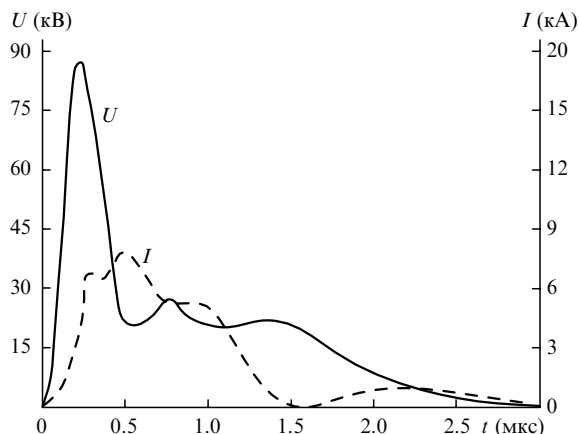


Рис.5. Оциллограммы напряжения и тока на рентгеновском предьонизаторе в согласованном режиме.

ции электронов. Конструкция рентгеновского предьонизатора аналогична конструкции рентгеновского источника прототипа усилителя [27].

С целью повышения однородности электронного пучка по площади взрывоэмиссионного катода для питания предьонизатора использована импульсная схема с обостряющей ёмкостью, что позволяет в начальный момент времени получить 1.5-кратное перенапряжение на вакуумном диоде. При этом форма напряжения и тока предьонизатора имеет колебательный характер, а поведение рентгеновского излучения и сигнала с системы измерения концентрации электронов аналогично поведению напряжения. Тщательный подбор параметров системы питания позволяет существенно уменьшить модуляцию напряжения и тока на предьонизаторе (рис.5).

Измерения степени неоднородности рентгеновского пучка на различных расстояниях от выходного окна предьонизатора, проведённые с помощью специальной аппаратуры, показали, что основной причиной неоднородности являются поперечные рёбра жёсткости конструкции опорной решётки разделительной фольги (рис.6). Отклонение плотности потока от среднего значения по поперечному сечению пучка вблизи выходного окна составляет ~35%. С ростом расстояния неоднородность быстро снижается, и на расстоянии 12 см от фольги (место

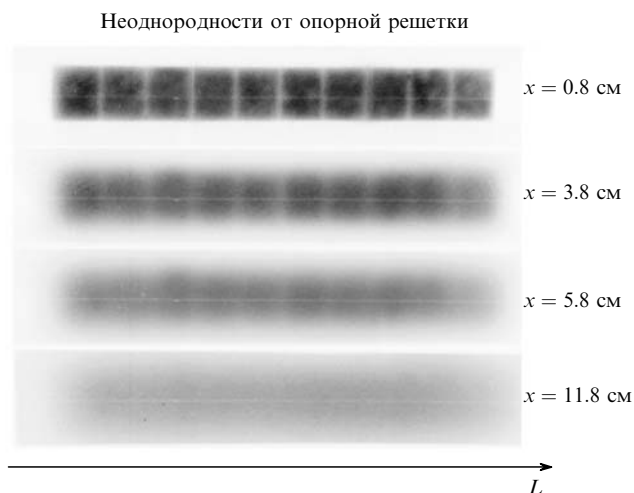


Рис.6. Фотография свечения визуализирующего (люминофорного) экрана; x – расстояние от выводной фольги.

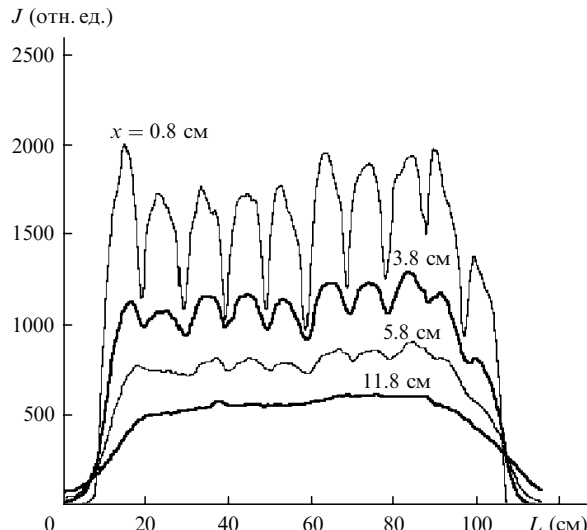


Рис.7. Пространственное распределение плотности потока рентгеновского излучения (денситограммы изображений, представленных на рис.6).

расположения катода разрядного промежутка УВД) она составляет менее 5% (рис.7).

Проведены также измерения концентрации электронов предьонизации N_0 и её зависимости от расстояния до выходного окна предьонизатора. В смеси CO₂:N₂:He = 2:1:17 при давлении 5 атм на расстоянии 7 см от мишени (в центре рабочего объёма системы накачки) $N_0 = 8.6 \times 10^8 \text{ см}^{-3}$. При этом средняя величина N_0 при изменении расстояния до выводной фольги от 2 см до 12 см уменьшается в 2.5 раза.

Мегавольтный ГИН собран по 16-ступенчатой схеме Говелла – Фитча.

В настоящее время под эгидой Европейской комиссии реализуется проект МНТЦ № 2521, основными задачами которого являются завершение изготовления разрядной камеры с совмещённым промежуточным водяным накопителем и её запуск в составе УВД, а также создание в России на основе УВД Международной пикосекундной CO₂-лазерной установки тераваттной мощности для проведения исследований по взаимодействию лазерного излучения с веществом.

4. Импульсно-периодические CO₂-лазеры для разделения изотопов средних масс

В настоящее время существует большая потребность в изотопах элементов средних масс, в частности в изотопах углерода и кислорода. Стабильные изотопы этих элементов широко используются в качестве меток в химии, биологии, физиологии, биохимии и медицине для изучения механизма образования химических соединений, процессов обмена веществ в живых организмах, механизма молекулярной наследственности и т. п.

За последние 20 лет в США, Англии и странах СНГ были созданы промышленные установки для получения высококонцентрированного изотопа ¹³C методом низкотемпературной ректификации CO. Однако стоимость изотопных продуктов, получаемых этим методом, очень высока, что во многих случаях сдерживает их использование.

Для промышленной реализации процесса обогащения углеродного сырья принципиально возможно ис-

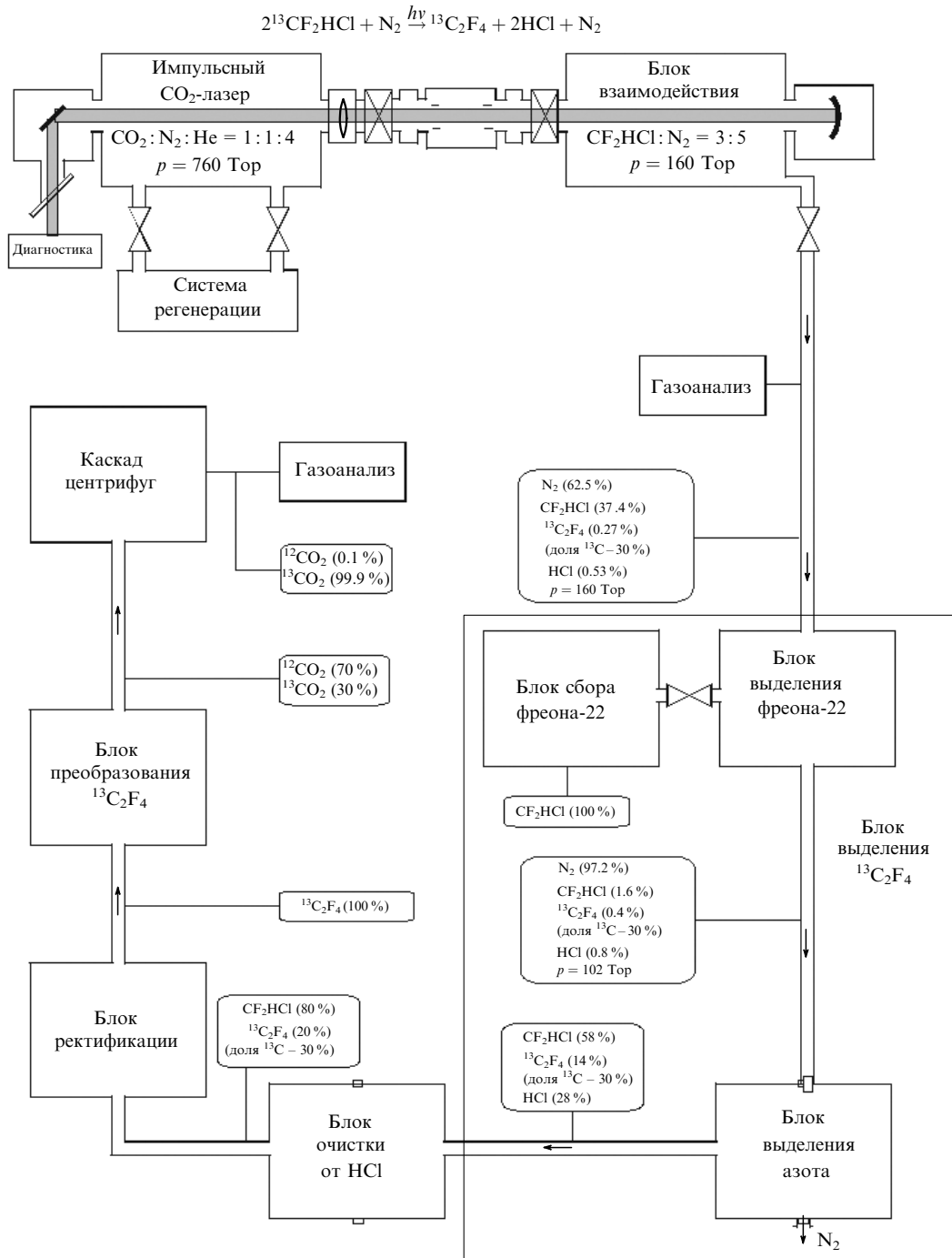


Рис.8. Блок-схема технологического комплекса для лазерного разделения изотопов углерода.

пользование химической, лазерной и центробежной технологий получения изотопа ^{13}C . Химическая и центробежная технологии достаточно экономичны при переработке больших количеств исходного сырья, но что касается получения высокообогащенного продукта, то аппаратное обеспечение процесса и создание нужного режима вызывают определенные трудности.

Наиболее привлекательным представляется лазерное разделение изотопов, эффективность которого обусловлена исключительно высокой селективностью лазерного возбуждения молекул [30]. Одним из наиболее эффективных методов лазерного разделения изотопов является метод ИК многофотонной диссоциации молекул (метод разработан и реализован в Институте спектроскопии

РАН). В работах [31–33] впервые сообщалось об обнаружении изотопически-селективной диссоциации молекул BCl_3 и SF_6 .

Для изотопического обогащения углерода было предложено использовать реакцию многофотонной диссоциации молекул фреона-22 (CF_2HCl) под действием излучения импульсно-периодического CO_2 -лазера [34]. Данный процесс имеет ряд достоинств, обеспечивающих его успешную реализацию в промышленных масштабах. Во-первых, сырьё (фреон-22) производится в больших количествах и стоит относительно дешево. После извлечения из него молекул изотопа ^{13}C фреон может быть возвращен производителю. Во-вторых, CO_2 -лазер является наиболее мощным и пригодным для промышленного ис-

пользования, а выбранная для резонансного возбуждения молекул фреона линия 9P(20) – одной из самых интенсивных в спектре генерации CO₂-лазера. Получающийся в результате диссоциации тетрафторэтилен достаточно устойчив и пригоден для последующей переработки.

Анализ [35] показал, что практически реализуемой и экономически выгодной технологией получения высокообогащённого изотопа ¹³C является двухэтапный процесс, осуществляющийся двумя методами. На первом этапе большие количества исходного сырья перерабатываются по лазерной технологии с предварительным обогащением до концентрации ¹³C, составляющей 10 % – 30 %. На втором этапе производится переработка по центробежной технологии сравнительно малых количеств углерода, полученных на первом этапе, в результате которой концентрация конечного продукта достигает более 99,0 %.

На основе исследований, проведённых в Институте спектроскопии РАН, ТРИНИТИ, НИИЭФА и ЦКБМ, в рамках проекта МНТЦ был создан разделительный комплекс для производства изотопов ¹³C.

Комплекс (рис.8) включает мощный ТЕА CO₂-лазер и разделительный реактор, в котором происходит диссоциация молекул фреона, содержащих изотоп ¹³C; лазер и реактор имеют общий оптический резонатор [36]. Подробное описание вспомогательных устройств комплекса приведено в работах [37–41].

Для реализации описанной технологии разделения изотопов углерода требуется мощный и надёжный CO₂-лазер со следующими характеристиками:

Длина волны излучения (мкм)	9.6
Энергия импульса (Дж).....	20
Плотность энергии на выходе лазера (Дж/см ²)	не менее 10
Длительность импульса (мкс).....	не более 0.5
Средняя мощность (кВт)	4
Частота следования импульсов (Гц)	200

Ресурс работы лазера без замены элементов должен составлять не менее 5×10^7 импульсов, общий ресурс работы – не менее 10^{10} импульсов. Непрерывная работа должна осуществляться 12 ч в сутки, 300 дней в году.

К началу разработки описываемой технологии не существовало лазеров с параметрами, удовлетворяющими требованиям технологического процесса, поэтому основной проблемой стало создание надёжного CO₂-лазера.

Основное препятствие, возникающее при попытке увеличения средней мощности, надёжности и длительности непрерывной работы ТЕА CO₂-лазеров, связано со сложностью и высокой стоимостью элементов импульсной техники, применяемых в системах накачки «быстрым» самостоятельным разрядом. Анализ паспортных характеристик этих элементов, в частности водородных тиратронов, производимых в промышленно развитых странах, показывает, что реально достижимый уровень средней мощности технологического ТЕА CO₂-лазера находится в пределах 0.5–1.0 кВт. При этом в силу известных особенностей самостоятельного разряда высокого давления ресурс работы электронного ключа может оказаться существенно ниже гарантированного производителем. Таким образом, возможность дальнейшего увеличения средней мощности импульсно-периодических CO₂-лазеров следует связывать либо с прогрессом в области импульсной техники, либо с разработкой новых, нетради-

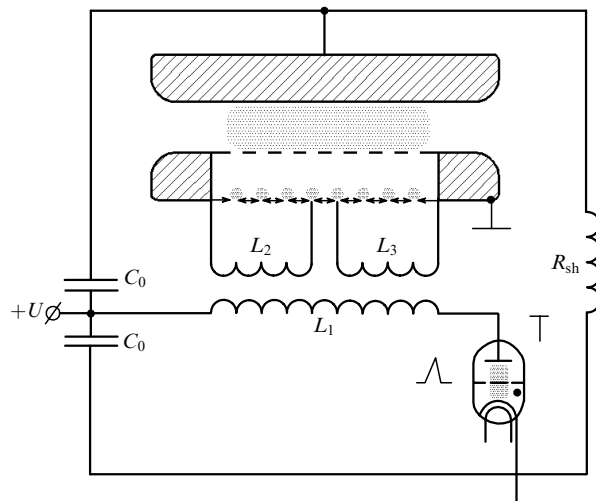


Рис.9. Схема возбуждения разряда накачки.

ционных схем возбуждения самостоятельного разряда, позволяющих существенно снизить требования к элементам импульсного питания лазера.

Наши исследования показали, что увеличение средней мощности лазера без существенной перегрузки элементов системы импульсного питания может быть достигнуто путём реализации трёх основных принципов: модульного построения электродной системы разряда, исключения силовоточных коммутаторов из цепи разряда накачки и максимально возможного увеличения длительности нарастания напряжения на разрядном промежутке.

В исследуемом лазере разряд возбуждался от ГИНа, построенного по схеме LC-генератора (рис.9). Важнейшим достоинством этой схемы является то, что длительность, скорость нарастания и амплитуда токов через коммутатор и основной разрядный промежуток определяются разными разрядными контурами. Очевидно, что чем больше удаётся «затянуть» фронт нарастания напряжения, тем меньшие значения этих параметров реализуются в контуре, коммутируемом тиратроном. Специальный дроссель-трансформатор (L_1, L_2, L_3) в цепи коммутатора обеспечивает УФ предыонизацию разрядного промежутка в течение всего времени нарастания напряжения. На рис.10 представлены осциллограммы напряжения на разрядном промежутке U , тока через разрядный промежуток I_d и тока через коммутатор I_c , полученные при разных значениях зарядного напряжения U_0 . Анализ осциллограмм даёт возможность сформулировать достоинства предложенной схемы возбуждения разряда накачки по сравнению с традиционной:

- в схеме с «затянутым» фронтом напряжение коммутации разрядного промежутка практически не зависит от величины зарядного напряжения U_0 ;

- во всём диапазоне изменения U_0 амплитуда тока через разрядный промежуток превышает амплитуду тока через тиратрон, причём это различие с ростом U_0 постоянно увеличивается.

Ещё одна проблема, возникающая при создании промышленного ТЕА CO₂-лазера, вызвана необходимостью поддержания постоянного химического состава рабочей газовой смеси, поскольку на мощности излучения и ресурсе ТЕА CO₂-лазеров в значительной степени сказываются изменения состава активной среды, обусловлен-

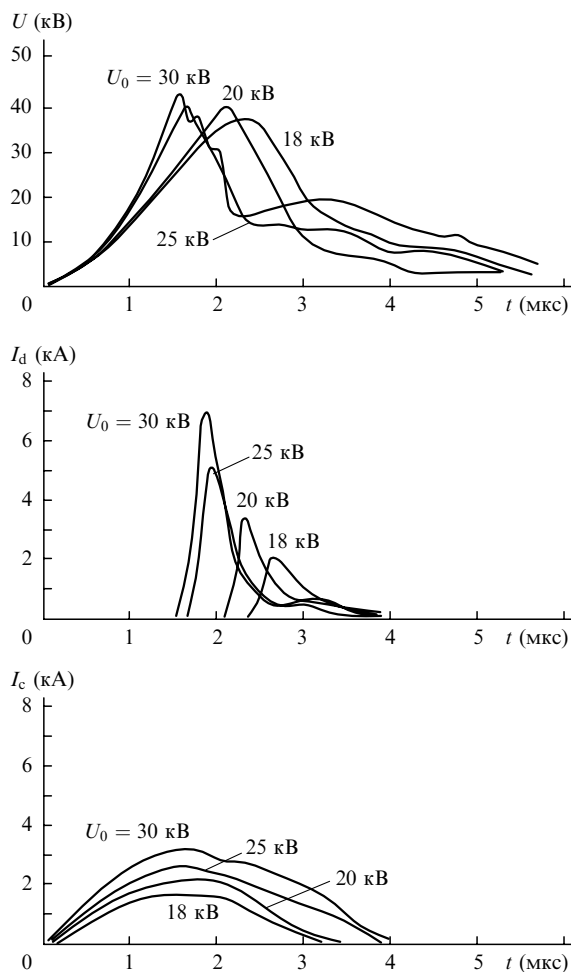


Рис.10. Осциллограммы напряжения на разряде U , тока через основной разрядный промежуток I_d и тока через коммутатор (тиратрон) I_c при различных значениях зарядного напряжения U_0 ; смесь предыонизации $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$, $p = 0.6$ атм.

ные протеканием в разряде множества плазмохимических реакций. Традиционным методом поддержания химического состава постоянным является подпитка-откачка рабочей смеси, что, однако, приводит к значительному расходу газов, в том числе дорогостоящего гелия, составляющего около 80 % рабочей смеси. Кроме того, при действии разряда на газовую смесь образуется значительное количество токсичных продуктов (CO , O_3 , NO_2 , C_nH_m и др.).

Технически более сложным, но более экономичным является метод каталитической регенерации рабочей смеси, задачей которой является очистка от «вредных» для разряда примесей и подавление диссоциации CO_2 . Этот метод и был использован в установке «Спектр». Он заключается в частичном отборе рабочей смеси из газового контура лазера, в пропускании её через регенератор и возвращении в контур. Комплексная технология регенерации смеси включает три стадии: фильтрацию от аэрозолей, адсорбционную очистку рабочей смеси от органических веществ, воды и продуктов плазмохимических процессов и каталитическую конверсию CO в CO_2 .

Применение системы регенерации позволило увеличить время непрерывной работы лазера «Спектр» без замены газовой среды более чем на порядок при частоте следования импульсов до 150 Гц. При частоте 150 Гц оно составило не менее 6 ч. Концентрация CO_2 устанавли-

вается на постоянном уровне, и в течение всего времени работы лазера оксид углерода и кислород не накапливаются, что подтверждают хроматографические измерения. При этом контрагирования разряда не наблюдается, а энергия лазерного излучения изменяется не более чем на 15 % от её начального значения.

При разработке оптического резонатора нами были использованы также нетрадиционные решения. Требуемая для развития многофотонной диссоциации плотность энергии излучения (до 10 Дж/см²) при достаточно большой длине зоны взаимодействия лазерного излучения с разделяемым веществом не может быть достигнута в традиционных оптических схемах. В традиционных экспериментах по лазерному разделению изотопов углерода типичная плотность энергии частотно-стабилизованного излучения, выводимого из лазера, равна 2.5–3.5 Дж/см², расходимость излучения составляет $(3 - 5) \times 10^{-3}$ рад.

Для многофотонной диссоциации фреона эта плотность близка к пороговой, а сверху она ограничена лучевой стойкостью пропускающих материалов. В проведённых экспериментах длина зоны взаимодействия излучения с веществом не превышала 1 м, и на диссоциацию молекул вещества расходовалось не более 20 % мощности излучения. Для эффективного использования излучения необходимо увеличить зону взаимодействия до нескольких метров, но тогда плотность энергии излучения вследствие его расходимости уменьшится в несколько раз и станет меньше пороговой.

Выход из этой ситуации был найден – объединение активной среды в лазере и поглощающей среды в блоке разделения в общем резонаторе, не выводящем излучение наружу. Основными элементами оптического резонатора, объединяющего лазерный и разделительный блоки (см. рис.8), являются дифракционная решётка, формирующие линзы из KCl и сферическое зеркало [36]. Вместо дифракционной решётки с коэффициентом отражения 60 % в первый порядок дифракции, которая обычно применяется в селективном резонаторе для вывода излучения, в реализованной нами схеме использована дифракционная решётка, отражающая основное излучение (до 95 %) в первый дифракционный порядок. Малая часть излучения, неизбежно выходящая в нулевой порядок, выводится из резонатора для диагностики параметров лазерного излучения.

С помощью формирующей линзы удастся уменьшить сечение пучка лазерного излучения в зоне реактора. Подбор коэффициента усиления лазерного блока и коэффициента поглощения в зоне взаимодействия позволяет получить значения плотностей энергии, недостижимые в случае традиционных оптических схем.

Для окончательного обогащения CO_2 до 99 % по изотопу ^{13}C используется каскад газовых центрифуг [42, 43]. При оптимальной производительности лазерно-центрифужного комплекса в режиме работы каскада достигается коэффициент извлечения около 50 % с промежуточным обогащением по изотопу ^{13}C до 20 % – 40 %. Реальная производительность каскада по дообогащению ^{13}C при расчётном коэффициенте извлечения ~ 50 % и концентрации изотопа ^{13}C около 25 % составляет 1 кг элемента в год.

К настоящему времени оборудование для полного цикла производства изотопов ^{13}C , включающее лазерный и разделительный блоки, блок выделения тетрафто-

этилена, а также каскад газовых центрифуг, изготовлено, смонтировано и налажено. Производительность получения изотопа ¹³C на лазерной части комплекса достигала 1.2 г/ч. Этого вполне достаточно для завершения технологического цикла и начала коммерческого использования установки.

Таким образом, можно констатировать, что в России создана новая технология получения изотопа ¹³C лазерно-центрифужным способом.

5. Применение лазеров высокого давления в технологических процессах

5.1. Обработка материалов

Импульсно-периодические CO₂-лазеры сравнительно небольшой средней мощности успешно применяются в термических технологиях вот уже более 20 лет. Области применения известны: скрайбирование керамических пластин, подгонка номиналов резисторов, маркировка деталей, пробивка отверстий, резка, сварка и т. д. (см. [44] и цитируемую там литературу). Для этих целей, как правило, используются ТЕ лазеры с накачкой комбинированным разрядом пониженного давления (менее 0.5 атм). Возможности применения лазеров с высокой пиковой мощностью (например, ТЕА лазеров) ограничены низкопороговым пробоем окружающего газа вблизи мишени. Кроме того, в [45] было показано, что при фиксированной энергии импульса затраты энергии на единицу объёма удалённого вещества (например, при сверлении) резко возрастают при длительностях импульсов менее 20 и более 80 мкс. Подобные результаты были получены и при исследовании процессов резки и сварки [46]. Поэтому, на наш взгляд, дальнейшие перспективы технологических применений CO₂-лазеров с высокой пиковой мощностью (кроме использования несфокусированных пучков) связаны с созданием лазеров с частотой следования 1–2 кГц и энергией в импульсе не более 0.1–0.2 Дж.

5.2. Лазерные источники многозарядных ионов

Пучки ионов широко используются в технологических целях для улучшения физико-химических, физико-механических, электрофизических и магнитных свойств поверхности и всего объёма материалов, а также для создания в поверхностных и приповерхностных слоях структур, которые невозможно получить традиционными методами химико-термической обработки. Ионная имплантация (легирование) позволяет ввести в любой материал любые легирующие примеси с целью улучшения усталостной прочности, износостойкости, коррозионной и радиационной стойкости [47]. Технологические возможности ионной имплантации материалов при высоких энергиях ионов обусловлены, в первую очередь, их повышенной проникающей способностью.

В промышленных ионных имплантерах используют двух-, трёх- и четырёхзарядные ионы, что позволяет поднять верхнюю границу энергетического диапазона установок соответственно в два, три и четыре раза при сохранении зарядных напряжений. Дальнейшее повышение зарядности при высоких плотностях ионных потоков традиционными способами (высоковольтные разряды и т. п.) наталкивается на очень большие технические сложности. Следует отметить, что увеличение зарядности приводит к значительному (до двух порядков по сравнению с однозарядными) уменьшению ионных токов и со-

ответственно снижает производительность имплантационных установок. Вышесказанным и объясняется интерес к лазерным сильноточным источникам многозарядных ионов, которые, кроме того, дают возможность генерировать ионы практически любых элементов.

В Лаборатории импульсной плазмы ТРИНИТИ проводятся исследования по генерации потоков многозарядных ионов при плотности мощности излучения CO₂-лазера $P \leq 4 \times 10^{13}$ Вт/см², длительности импульса $\tau_p = 13 - 30$ нс и энергии $E \leq 100$ Дж [48, 49]. Лазерная система в зависимости от поставленных задач может представлять собой или простейшую схему в режиме свободной генерации или усилительную схему с компрессией импульса, включающую задающий генератор, ячейку нелинейного поглотителя и усилитель. Последняя схема, основанная на имеющемся в лаборатории усилителе атмосферного давления, по расчётам может обеспечить генерацию импульса длительностью 200–500 пс с энергией 5–10 Дж. Существующие разработки позволяют реализовать указанные лазерные схемы в режиме импульсно-периодической работы с частотой следования 1–10 Гц.

В ГНЦ РФ ИТЭФ совместно с ГНЦ РФ ТРИНИТИ, НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, МИФИ, ОИЯИ и РИЦ «Курчатовский институт» разработан принципиально новый тип технологического оборудования – система из мощного частотного лазера ИК диапазона длин волн, камеры взаимодействия с мишенным узлом и устройства экстракции сильноточного пучка ионов и ядер [50–53]. Эта система, представляющая собой лазерно-плазменный инжектор ионов, позволяет генерировать интенсивные пучки высокоионизованных атомов и ядер элементов, включая редкие и радиоактивные изотопы, и инжектировать их в электрофизические устройства, открывая тем самым новые перспективы развития науки и техники.

Основой инжектора является уникальный сверхмощный (более 5 ГВт) CO₂-лазер с частотой следования импульсов до 1 Гц. Разрядный модуль накачки, базирующийся на самостоятельном разряде с рентгеновской пре-дйонизацией, был впервые построен в 2001 г. в ИТЭФ. Активный объём лазерной камеры модуля (~40 л) пред-варительно ионизуется пучком рентгеновского излучения с экспозиционной дозой около 3 бэр. Разработанный для питания разряда высоковольтный генератор с энергозапасом 6 кДж и напряжением холостого хода 400 кВ полностью построен на отечественной элементной базе. В режиме свободной генерации получена энергия излучения до 250 Дж в импульсе длительностью около 90 нс.

Созданная установка обладает следующими возможностями:

- генерировать ионы большинства элементов периодической таблицы Менделеева;
- генерировать интенсивный короткий (1–100 мкс) ионный импульс с рекордно высокой яркостью;
- работать в импульсно-периодическом режиме с ресурсом в сотни часов.

5.3. Получение наноразмерных порошков

В последние годы в связи с развитием технологий синтеза наноструктурированных объёмных материалов с улучшенными механическими и новыми электромагнитными и оптическими свойствами [54] значительное внимание уделяется получению наноразмерных порошков. Существует достаточно большое количество методов получения наночастиц, их подробный анализ приведён,

например, в работах [55, 56]. Длительное время лазерное излучение для этих целей почти не использовалось из-за низкой производительности и высоких энергозатрат. В то же время сам метод испарения вещества излучением лазера с последующей конденсацией пара известен давно и всегда привлекал внимание благодаря чистоте и малым размерам получаемых частиц, дешевизне и разнообразию исходных материалов. Доказать его конкурентоспособность с другими методами удалось сравнительно недавно.

Основные успехи в этом направлении достигнуты в Институте электрофизики УрО РАН, Екатеринбург. В работе [56] сообщается о конструкции и характеристиках установки для получения нанопорошков оксидов металлов, производительность которой при мощности излучения 30–40 Вт достигала 20 г/ч при среднем размере частиц 15 нм. Нанопорошки производились методом испарения материала мишени излучением импульсно-периодического CO₂-лазера. В результате экспериментов было установлено [56]:

1. Импульсный CO₂-лазер позволяет в 4 раза уменьшить размер частиц в воздухе при нормальных условиях и мощности, не превышающей наиболее низких значений, полученных для лазеров с непрерывным излучением.

2. Эффективность использования излучения для получения нанопорошка (это отношение удельной энергии испарения исходного вещества мишени в Дж/г к полным удельным затратам энергии для получения весовой единицы нанопорошка) составляет менее 10 %, и её можно повысить даже при той же средней мощности за счёт уменьшения длительности излучения и повышения частоты следования импульсов.

3. Разработанные технология и установка позволяют получать чистые нанопорошки сложных составов с достаточно узким распределением частиц по размерам при использовании мишеней из более грубых порошков, состоящих как из уже готовых химических соединений, так и из механических смесей компонентов. При этом для получения желаемого состава следует учитывать, что в получаемом порошке происходит снижение содержания компонента с более высокой температурой кипения по сравнению с его содержанием в сырье.

5.4. Лазерное ускорение электронов

Проблема разработки ускорителей с высоким темпом ускорения частиц стала особенно острой после закрытия проекта создания гигантского ускорительного сверхпроводникового суперколлайдера. В связи с этим в последние годы стали усиленно проводиться поисковые, в первую очередь экспериментальные, исследования с целью нахождения реальных возможностей увеличения темпа ускорения.

Современные тераваттные пикосекундные лазеры могут обеспечивать интенсивности до $10^{18} - 10^{19}$ Вт/см² в области фокуса, что соответствует напряженности электрических полей до ~ 60 ГВ/см. Большинство разрабатываемых схем основаны на использовании мощных CO₂-лазеров. При этом разрабатываются два типа лазерных ускорителей. Прямое взаимодействие электронного пучка с лазерными полями используется в схемах обращённого лазера на свободных электронах и в схеме обращённого черенковского ускорителя. В другом типе схем лазерные поля (поперечные) используются для образования плазмы и создания продольных ускоряющих полей.

К ним относятся лазерный ускоритель (Laser Wake Field Accelerator) и ускорители в плазме, создаваемой волнами биений за счёт двухчастотной лазерной волны (Laser Beat Wave Accelerator). Ускорение электронов в этих случаях осуществляется продольными электрическими полями, возникающими в результате образования пространственно периодической модуляции плотности заряда плазмы (плазменные волны).

Физические процессы в лазерных ускорителях достаточно сложны и требуют дальнейшего изучения. В 1960–1980-х годах в Советском Союзе уделялось большое внимание новым методам ускорения электронов и было достигнуто явное лидерство в теоретических разработках. В настоящее время большинство наиболее существенных экспериментальных работ проводится в США. Россия в этой области явно отстаёт.

6. Заключение

Итак, с одной стороны, прогресс в развитии мощных импульсных CO₂-лазеров высокого давления не вызывает сомнений. С другой стороны, успехи в фундаментальных и технологических применениях лазеров этого типа, по-видимому, принадлежат будущему. И связаны они, по нашему мнению, с созданием CO₂-лазерных комплексов тераваттного уровня мощности, пикосекундного и фемтосекундного диапазонов длительности импульсов. Именно в этой области появится, наконец, возможность реализовать преимущества CO₂-лазеров перед твёрдотельными лазерами – преимущества большой длины волны излучения. В первую очередь это относится к высокояркостным источникам рентгеновского излучения и к проектам по ускорению заряженных частиц световой волной. Подтверждением тому является выделение мировым сообществом значительных финансовых средств для поддержания этих проектов.

1. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Напартович А.П. и др. *ЖТФ*, **46**, 355 (1976).
2. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Сатов Ю.А., Степанов Ю.Ю. *Квантовая электроника*, **2**, 2086 (1975).
3. Аполлонов В.В., Васьковский Ю.М., Жаворонков М.И., Прохоров А.М., Ровинский Р.Е., Роголин В.Е., Устинов Н.Д., Фирсов К.Н., Ценина И.С., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **12**, 5 (1985).
4. Ашурлы З.И., Васьковский Ю.М., Гордеева И.А., Малышев Л.В., Ровинский Р.Е., Холодилов А.А. *Квантовая электроника*, **7**, 1456 (1980).
5. Аполлонов В.В., Миненков В.Р., Прохоров А.М., Сёмкин В.В., Фирсов К.Н., Шубин Б.Г., Ямщиков В.А. *Квантовая электроника*, **11**, 1327 (1984).
6. Аполлонов В.В., Байцур Г.Г., Прохоров А.М., Фирсов К.Н. *Письма в ЖТФ*, **12**, 1262 (1985).
7. Аполлонов В.В., Байцур Г.Г., Прохоров А.М., Фирсов К.Н. *Квантовая электроника*, **13**, 960 (1986).
8. Аполлонов В.В., Байцур Г.Г., Прохоров А.М., Фирсов К.Н. *Письма в ЖТФ*, **13**, 558 (1987).
9. Аполлонов В.В., Байцур Г.Г., Кудабаяв Б.Б., Прохоров А.М., Сёмкин В.В., Трефилов Е.Э., Фирсов К.Н., Шубин Б.Г. *Квантовая электроника*, **14**, 2139 (1987).
10. Аполлонов В.В., Байцур Г.Г., Кудабаяв Б.Б., Прохоров А.М., Сёмкин В.В., Трефилов Е.Э., Фирсов К.Н., Шубин Б.Г. *Тез. докл. IV Всес. конф. по физике газового разряда* (Махачкала, изд-во ДГУ, 1988, ч. 2, с. 69).
11. Аполлонов В.В., Ахунов Н., Миненков В.Р., Пельцман С.С., Прохоров А.М., Сёмкин В.В., Фирсов К.Н., Шубин Б.Г. *Квантовая электроника*, **11**, 1241 (1984).
12. Аполлонов В.В., Буш Г.В., Миненков В.Р., Прохоров А.М.,

- Сёмкин Б.В., Соболев В.М., Фирсов К.Н., Шубин Б.Г., Юшин А.В. *Квантовая электроника*, **11**, 2149 (1984).
13. Павловский А.И., Басамыкин В.Ф., Горохов В.В., Карелин В.И., Репин П.Б. *Тез. докл. II Всес. сов. по физике электрического пробоя газов* (Гарту: изд-во ТГУ, 1984, с. 330).
 14. Бурцев В.А., Гордейчик А.Г., Кучинский А.А., Родичкин В.А., Смирнов В.А., Томашевич В.П. *Квантовая электроника*, **15**, 1376 (1988).
 15. Дашук П.Н., Кулаков С.Л., Кучинский А.А., Рыбин Ю.В., Смирнов В.А. *ЖТФ*, **57**, 50 (1987).
 16. Кулаков С.Л., Кучинский А.А., Масленников А.Г., Рыбин Ю.В., Смирнов В.А., Томашевич В.П., Шестаков И.В. *ЖТФ*, **60**, 43 (1990).
 17. Гордейчик А.Г., Масленников А.Г., Кучинский А.А., Родичкин В.А., Смирнов В.А., Томашевич В.П., Шестаков И.В., Янкин Е.Г. *Квантовая электроника*, **18**, 1173 (1991).
 18. Sumida S. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **33**, 913 (1978).
 19. Lin C.S. et al. *Appl. Phys. Lett.*, **34**, 310 (1979).
 20. Генкин С.А., Козырев А.В., Королёв Ю.Д., Месяц Г.А., Новожилов Ю.Н., Прохоров А.М., Скакун В.С., Тарасенко В.С. и др. *Квантовая электроника*, **11**, 3 (1984).
 21. Jaupat K., Alcock A.J. *J. Appl. Phys.*, **58**, 1719 (1985).
 22. Pogorelsky I.V., Ben-Zvi I., Badzien M., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3683**, 15 (1998).
 23. Tochitsky S.Ya., Narang R., Filip C., et al. *Opt. Lett.*, **24**, 1717 (1992).
 24. Apollonov V.V., Kazakov K.Kh., Pletneyev N.V., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3574**, 140 (1998).
 25. Tsumeni A., Endo A., Washio M., et al. *Proc. Int. Conf. «Lasers'97»* (McLean, VA: STS Press, 1997, p. 839).
 26. Коробочко В.Ю., Кулаков С.Л., Кучинский А.А. и др. *Матер. VIII Всес. конф. «Физика низкотемпературной плазмы»* (Минск, изд-е АНК ИТМО, 1991, ч. 2, с. 81).
 27. Baranov G.A., Kuchinsky A.A., Tomashevich V.P., et al. *Plasma Devices Operation*, **5**, 199 (1997).
 28. Apollonov V.V. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 317 (2001).
 29. Астахов А.В., Баранов Г.А., Перфильев С.А. и др. *Устройство накачки широкоапертурного лазера или усилителя высокого давления*. Патент на изобретение № 2212083 от 15.05.2002 г.
 30. Велихов Е.П. и др. *Импульсные CO₂-лазеры и их применение для разделения изотопов* (М.: Наука, 1983).
 31. Ambartzumian R.V., Chekalin N.V., Doljikov V.S., et al. *Chem. Phys. Lett.*, **25**, 515 (1974).
 32. Амбарцумян Р.В., Летохов В.С., Рябов Е.А., Чекалин Н.В. *Письма в ЖЭТФ*, **20**, 597 (1974).
 33. Амбарцумян Р.В., Горохов Ю.А., Летохов В.С., Макаров Г.Н. *Письма в ЖЭТФ*, **21**, 375 (1975).
 34. Дядькин А.П., Кузьменко В.А., Лаптев В.Б. и др. *Химич. физика*, **7** (2), 165 (1988).
 35. Kaliteevsky A.K., Sokolov E.N., Godisov O.N., et al. *Proc. VI Intern. Symp. on the Synthesis and Applications of Isotopes and Isotopically Labeled Compounds* (London: J. Wiley & Sons, 1998, v. 148, p.688).
 36. Аватков О.П., Ананьев Ю.А., Астахов А.В., Баранов Г.А. и др. А.с. № 1522525 от 15.07.1989 г.
 37. Астахов А.В., Баранов Г.А., Зинченко А.К. и др. *Тез. докл. конф. «Прикладная оптика-96»* (С.-Петербург: изд-е ВНИЦ ГОИ, 1996, с. 265).
 38. Астахов А.В., Баранов Г.А., Кучинский А.А. и др. Патент на изобретение № 2212083, от 10.09.2003 г.
 39. Астахов А.В., Барабанщиков А.А., Баранов Г.А. и др. Патент на изобретение № 2141718 от 10.03.1998 г.
 40. Астахов А. В., Баранов В. Ю., Баранов Г. А. и др. *Тез. докл. I Всес. конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул»* (Звенигород: изд-во ЦНИИАТОМИНФОРМ, 1996, с. 21).
 41. Астахов А.В., Баранов Г.А., Зинченко А.К. и др. *Российский химич. журн.*, **XLV**, 89 (2002).
 42. Баранов В.Ю. (ред.). *Изотопы* (М.: Наука, 2000).
 43. Godisov O.N., Kaliteevsky A.K. *Proc. Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases (SPLG'2000) July 24-27, 2000. Moscow, 2000.*
 44. Низьев В.Г., Полулях В.П., Сейдгазов Р.Д. *Препринт НИЦТ-ЛАН № 46* (Троицк, 1983).
 45. Веденов А.А., Гладуш Г.Г., Дробязко С.В., Сенаторов Ю.М. *Квантовая электроника*, **8**, 2154 (1981).
 46. Реди Дж. *Промышленные применения лазеров* (М.: Мир, 1981).
 47. Плешивцев Н.В., Бажин А.И. *Физика воздействия ионных пучков на материалы* (М.: Вузовская книга, 1998).
 48. Хоменко С.В., Макаров К.Н. и др. *Препринт ТРИНИТИ 0079-А* (Троицк, 2001).
 49. Makarov K.N., Khomenko S.V., Nishchuk S.G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4424**, 442 (2001).
 50. Макаров К.Н., Стрельцов А.П., Рерих В.К. Сатов Ю.А., Степанов А.Е., Шамаев О.Б., Шарков Б.Ю., Хозерот Х., Лангбайн К., Шервуд Т.Р. *ЖЭТФ*, **106**, 1649 (1994).
 51. Sharkov B., Kondrashev S., Savin S., Shumshurov A., Haseroth H., Kugler H., Langbein K., Lisi N., Magnusson H., Scrivens R., Khomenko S., Makarov K., Roerich V., Stepanov A., Satov Yu. *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 1035 (1998).
 52. Алексеев Н.Н., Алексеев П.Н., Балануша В.Н., Березницкий С.Л. и др. *Труды XVII Совец. по ускорителям заряженных частиц* (Протвино, 2000, с. 98).
 53. Mescheryakov N.D., Alexeev N.N., Kondrashev S.A., Konyukov K.V., Nikolaev V.I., Roudskoy I.V., Savin S.M., Sharkov B.Yu., Shumshurov A.V. *Laser Particle Beams*, **20**, 455 (2002).
 54. Гусев А.И., Ремпель А.А. *Нанокристаллические материалы* (М.: Наука, 2000, с. 222).
 55. Muller E. et al. *Powder and Particle*, **13**, 79 (1995).
 56. Котов Ю.А., Осипов В.В., Иванов М.Г. и др. *ЖТФ*, **72**, 76 (2002).