

Бакулин Игорь Александрович

**ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИЙ CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕР  
С ШИРОКОАПЕРТУРНЫМ ОДНОРОДНЫМ ПУЧКОМ  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.21 - Лазерная физика.

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Самара - 2003

Работа выполнена в Самарском государственном университете.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук Петров Алексей Леонтьевич.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Журавлев Олег Анатольевич,

кандидат физико-математических наук Ламажапов Хубита Доржиевич.

Ведущая организация: Конструкторское Бюро автоматических систем,  
г. Самара.

Защита состоится «14» февраля 2003 г. в 16<sup>00</sup> часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.218.01 при Самарском государственном  
университете, 443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского  
государственного университета.

Автореферат разослан «13» января 2003 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент

В. А. Жукова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Импульсно-периодические  $\text{CO}_2$ -лазеры в настоящее время нашли свое применение в различных областях науки и техники, зарекомендовав себя в качестве эффективного инструмента. Одним из быстро развивающихся направлений, которые стимулируют дальнейшие исследования в области импульсно-периодических  $\text{CO}_2$ -лазеров, являются производства, связанные с поверхностной обработкой различных материалов. В качестве примера такого рода операций можно привести формирование поверхностных структур типа решётки для генерации акустических волн, маркировку изделий радиоэлектронной, электротехнической и других отраслей промышленности, получение микроотверстий и т.д.

Весьма динамично развивается технология лазерной маркировки. Она основана либо на удалении слоя материала поверхности в локальной области воздействия луча, либо на фотохимическом преобразовании в поверхностном слое, когда информация фиксируется за счёт модификации оптических свойств поверхности в месте воздействия лазерного луча.

Лазерную маркировку выгодно отличает от традиционных методов ряд особенностей. Во-первых, практически полностью отсутствует механическое воздействие на изделие. Во-вторых, бесконтактность лазерной маркировки позволяет сравнительно легко внедрять этот процесс в различные виды производства. Кроме того, его отличает экологическая чистота, высокая стойкость знаков к внешним воздействиям и легкая перестраиваемость, что в конечном итоге делает этот вид маркировки в большинстве случаев предпочтительнее.

Существует два подхода в реализации этой технологии. Первый способ использует технику сканирующего луча, осуществляя поточечное нанесение информационных символов. Данное направление в настоящее время хорошо развито и достаточно широко представлено серийными изделиями на рынке соответствующего оборудования. Отличительной особенностью этого способа является высокая гибкость в отображении информации, однако, его производительность имеет принципиальное ограничение, связанное с частотой следования импульсов. На сегодняшний день скорость нанесения символов у лучших представителей данного типа маркеров составляет от 10 до 30 знаков в секунду. Этот показатель является достаточно хорошим, но только для маркировки неподвижных объектов. В случае движущегося объекта область нанесения информации успевает сместиться. Так, например, при скорости изделия в 1 м/сек (скорость движения кабеля в процессе его производства) за время отображения всего одного символа зона взаимодействия сместится на 3 см. Кроме того, для управления лучом сканатора применяется компьютерное оборудование, что делает этот тип маркировки достаточно дорогостоящим. (Стоимость сканаторных маркеров на базе  $\text{CO}_2$ -лазеров составляет ~25000\$).

В основе второго способа лежит проекционный метод, когда информация переносится широкоапертурным пучком излучения, прошедшим через маску-трафарет, за один импульс длительностью  $\sim 10^{-6}$  сек. Проекционный способ маркировки особенно эффективен, когда требуется многократное повторение отображаемой информации при его нанесении на объект. Эта ситуация характерна для производства конвейерного типа. При этом частота импульсов излучения не является определяющим фактором производительности в отличие от сканаторов. Так для внедрения проекционного маркера в известные технологические процессы во многих случаях потребуется частота повторения импульсов в интервале 1-10 Гц, что легко реализуемо. (Например, для маркировки движущего кабеля потребуется частота в 1 Гц). Вопросы масштабирования и смены трафарета в проекционном методе так же легко решаемы.

Однако для осуществления проекционного способа маркировки необходимо, чтобы пучок излучения, осуществляющий перенос информации, одновременно удовлетворял трём основным требованиям, а именно: энергия в импульсе должна быть достаточной для модификации поверхностной структуры объекта, пучок должен обладать необходимой для проецирования некоторого набора символов апертурой и распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка должно быть достаточно равномерным.

Из литературных источников следовало, что для качественного отображения информации требуются пучки излучения с плотностью потока энергии в (1-10) Дж/см<sup>2</sup>. А в случае маркировки радиотехнических изделий, где требуется технология, не вызывающая изменений электрических параметров элементов, (например, на основе применения светочувствительного покрытия), оптимально подходит короткий импульс излучения с длиной волны 10,6 мкм. Более того, излучение этого диапазона является предпочтительным при поверхностной обработке стекла.

Предварительный анализ показал, что перспективным направлением для решения поставленных задач является использование импульсно-периодического ТЕА СО<sub>2</sub>-лазер. ТЕА (Transversely Excited Atmospheric) – это обозначение лазеров с поперечно возбуждаемым разрядом атмосферного давления. Изучение российского рынка технологических лазерных установок данного класса показало, что существующие образцы не могут быть непосредственно использованы в технологии проекционной маркировки, поскольку, их параметры не соответствуют необходимым. Более того, на момент постановки задачи отсутствовали готовые образцы и за рубежом.

В связи с этим исследование основных физических процессов, протекающих в ТЕА СО<sub>2</sub>-лазерах и определяющих условия формирования широкоапертурных однородных пучков излучения высокой мощности, представляется актуальным, способствуя расширению технологических возможностей соответствующих лазерных устройств.

## Цель предлагаемой работы:

Исследование условий однородного возбуждения активной среды ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера.

Разработка компактного ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера, способного формировать пучок излучения с равномерной в сечении интенсивностью и параметрами:

плотность потока энергии	не менее $1 \text{ Дж/см}^2$ ,
апертура пучка	- не менее $2 \times 2 \text{ см}^2$
длительность импульса	1-10 мксек,
частота следования	1-10 Гц.

Создание экспериментального образца, который мог бы послужить прототипом для проектирования установки технологического типа.

## Научная новизна.

Разработан экспериментальный образец ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с искровой предыонизацией, который позволяет формировать однородные пучки излучения с плотностью энергии до  $2 \text{ Дж/см}^2$  при апертуре  $3 \times 2 \text{ см}^2$ .

Предложена эффективная схема формирования объёмного тлеющего разряда с коммутацией на электродную систему высоковольтных импульсов разной полярности.

Разработан низкоиндуктивный биполярный генератор высоковольтных импульсов для возбуждения активных сред ТЕА лазеров, (обобщенный вариант схемы биполярного генератора импульсов высокого напряжения защищен свидетельством об изобретении).

Впервые применен для расчёта профилей электродов разрядной камеры ТЕА лазеров метод эквивалентных зарядов.

Исследован механизм деградации экспериментального образца ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера, предложен и испытан способ компенсации разложения активной компоненты, который позволяет стабилизировать параметры пучка излучения при работе в "отпаянном" режиме.

## Практическая значимость работы.

Созданный экспериментальный образец ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазер с искровой предыонизацией может служить прототипом для создания технологических установок, применяемых в области поверхностной обработки материалов, например, в проекционной маркировке.

Предложенная модель лазера с предыонизацией ультрафиолетовым излучением поверхностного коронного разряда продемонстрировала возможность создания с этим типом предыонизации компактного, недорогого и простого в эксплуатации ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера. В настоящее время действующий образец используется в качестве прибора физического практикума при проведении лабораторных работ на кафедре Оптики и спектроскопии Самарского государственного университета.

Примененный метод расчёта электродных профилей может эффективно использоваться при инженерном проектировании ТЕА лазеров.

Результаты исследований процесса деградации будут необходимы для разработчиков технологических ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазеров.

Предложенная схема предыонизации на основе поверхностного коронного разряда может быть использована при возбуждении ТЕА лазеров с другим типом активной среды, например, в эксимерных средах.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Предложена система возбуждения объёмного тлеющего разряда в ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазере, в которой на электроды основного разрядного промежутка коммутируются высоковольтные импульсы с противоположным знаком, а вспомогательный внешний электрод является заземленным. Такая схема позволяет отказаться от использования на внешней поверхности разрядной камеры элементов с высоким потенциалом.

Для возбуждения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера разработан биполярный генератор высоковольтных импульсов, который осуществляет необходимый энерговклад за времена  $< 1$  мксек.

В результате разработана действующая модель компактного ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с ультрафиолетовой предыонизацией поверхностным коронным разрядом, которая позволяет формировать однородный пучок излучения с энергией в импульсе до 6 Дж, апертурой  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup>, частотой следования импульсов 1-2 Гц.

2. Впервые применен для расчета профилей электродов ТЕА лазеров метод эквивалентных зарядов.

Созданный с использованием данной методики экспериментальный образец ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с искровой предыонизацией обеспечивает получение однородного пучка излучения с энергией в импульсе до 12 Дж, апертурой  $30 \times 20$  мм<sup>2</sup>, с частотой следования 1-10 Гц.

3. В результате исследований механизма деградации рабочей смеси ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера решена задача стабилизации. Так, ввод в состав активной среды оксида углерода с парциальным давлением в  $(15 \div 18) \% \pm 2\%$  от парциального давления  $\text{CO}_2$  (в зависимости от типа предыонизации, состава и давления рабочей смеси) приводит к установлению динамического равновесия между реакциями диссоциации молекул  $\text{CO}_2$  и их восстановлением, и обеспечивает стабильность энергии с точностью  $\sim 10\%$  при генерации не менее  $10^5$  импульсов.

### **Апробация результатов.**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: X-ой Всероссийской конференции по физике газового разряда (г. Рязань, 2000 г.); VI-ой научно-методической конференции стран Содружества (г. Самара, 2000 г.).

## **Публикации.**

Основные результаты работы опубликованы в 4 статьях, 2 сборниках докладов и их тезисов, защищены двумя авторскими свидетельствами об изобретении.

Общее количество работ, опубликованных по теме диссертации, составляет 8 наименований.

## **Структура и объём диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и трёх приложений. Полный объём составляет 126 стр., включая 33 рисунка, 4 фотографии, приложения и список литературы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель работы и задачи исследований, основные положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, кратко изложено содержание работы.

**В первой главе** сформулированы основные требования, предъявляемые к системам возбуждения активной среды в ТЕА  $\text{CO}_2$  лазерах, и, выполнение которых, по сути, является определяющим условием формирования широкоапертурных однородных пучков с высокой плотностью энергии. Здесь также перечислены те проблемы, с которыми приходится сталкиваться при организации самостоятельного объёмного тлеющего разряда. Приводится обзор работ, посвящённых схемам возбуждения на основе самостоятельного разряда, с указанием полученных авторами удельных характеристик, анализом их достоинств и недостатков. Обосновывается выбор систем предварительной ионизации среды для разработки соответствующих лазерных устройств. При проведении работ предлагается исследовать систему возбуждения с поверхностным коронным разрядом и систему, построенную на основе дискретных искровых разрядников.

Кроме того, дан обзор известных способов решения задачи по профилированию электродов для лазеров высокого давления и альтернативных методов создания условий для получения однородного тлеющего разряда.

Поскольку имеющиеся способы аналитического решения электрических полей возможны лишь для немногих, технически приемлемых, электродных систем, то для описания поля между электродами сложной формы в этой главе рассмотрен способ наложения, согласно которому большое число единичных зарядов размещаются таким образом, что их суммарное влияние создаёт требуемые эквипотенциальные поверхности.

Это так называемый метод эквивалентных зарядов. Рассматривается поле, создаваемое системой двух бесконечно длинных линейных проводников с одинаковой плотностью заряда, расположенных над заземленной плоскостью, с привлечением зеркального отображения зарядов. Потенциал, создаваемый подобной системой проводников в произвольной точке, в приближении, когда длина проводника много больше межэлектродного расстояния, равен:

$$\varphi = -q \cdot \ln \frac{r_1 \cdot r_2}{r_3 \cdot r_4},$$

где  $q$  - заряд на единицу длины,  
 $r_i$  - расстояние от точки пространства  $(x,y)$  до  $i$ -го проводника.

Из условия неизменности потенциала выводится уравнение эквипотенциалей в координатной плоскости  $(x,y)$ . Решив его, получим выражение для нахождения координат профилей эквипотенциальных поверхностей, часть из которых могут быть использованы для задания профилей электродов. На рис.1а приведены некоторые эквипотенциали для электродов равной толщины, рассчитанные для межэлектродного промежутка в 3см, а на рис.1б соответствующее распределение поля на их поверхности.

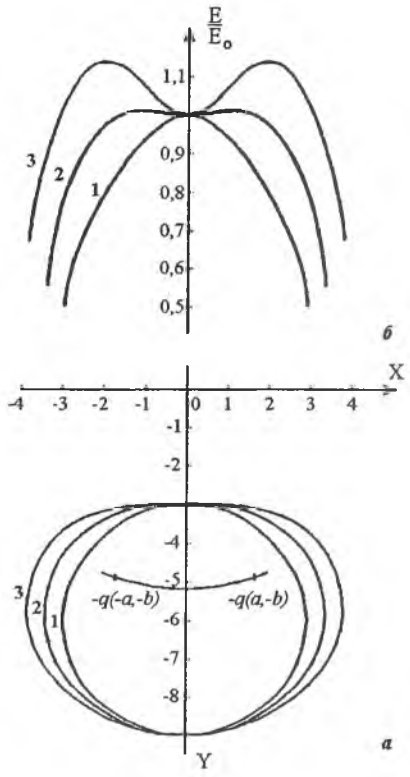


Рис.1. Профили некоторых эквипотенциальных поверхностей, рассчитанных для электродов равной толщины, и соответствующие им распределения полей.

Рассмотрены следующие случаи:

- 1)  $a = 0$ , эквипотенциали окружности, имеем один максимум;
- 2)  $a = \frac{1}{2} |y_1 + y_2| - \sqrt{y_1 \cdot y_2}$  - максимум напряженности поля в вершине электрода, но с более равномерным распределением по сравнению со случаем 1). Неоднородность поля в максимуме  $\sim 1,3\%$ .
- 3)  $a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{y_1}{y_2} \cdot (y_1 - y_2)^2}$  - профиль с

радиусом кривизны в вершине  $R = \infty$  (квазиплоский электрод). Поле имеет два боковых максимума. Величина неоднородности по отношению к вершине  $\sim 13,5\%$ .



Вторая глава посвящена исследованиям условий возбуждения активной среды ТЕА  $\text{CO}_2$  лазера с предварительной ионизацией ультрафиолетовым излучением поверхностного коронного разряда и созданию на её основе действующей установки. Работы проводились на разрядной камере из стекла, цилиндрической геометрии. Первоначально решалась задача масштабирования, поскольку рабочий объём прототипа составлял  $5 \text{ см}^3$  ( $V=0,5 \times 1 \times 10 \text{ см}^3$ ) (и на предварительную возможность получения необходимого пучка излучения указывала лишь величина, полученного авторами, удельного энергосъёма  $\sim 24 \text{ Дж/л}\cdot\text{атм.}$ ). Далее рассматривается способ оптимизации системы предыонизации, основанной на коронном разряде по поверхности диэлектрика, в котором предлагается новая схема коммутации высоковольтных импульсов и вспомогательного электрода. Система инициирования самостоятельного разряда организована таким образом, что на основные электроды РК

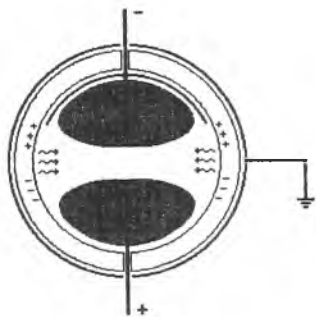


Рис.2. Схема поперечного сечения разрядной камеры ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с коронной предыонизацией.

коммутируются высоковольтные импульсы противоположной полярности, в то время как вспомогательный электрод, расположенный на внешней поверхности диэлектрической стенки РК, "заземлен", рис.2.

В результате поляризации диэлектрика, в областях примыкающих к аноду и катоду, возникают две области наведенного поверхностного заряда с разным знаком. Поле положительных поверхностных зарядов в области катода, вытягивая свободные электроны из облака коронного разряда, окружающего катод, способствуют формированию плотного поверхностного разряда. Наличие отрицательного заряда на поверхности диэлектрика в области анода будет способствовать

переходу разряда из приповерхностной зоны в более удаленные слои газа. Такая схема, как показали эксперименты, позволяет работать с поверхностным разрядом, критерий мощности которого находится на границе областей сильноточных разрядов и разрядов малых токов ( $V/L \sim 10^{10} \text{ В/Гн}$ ). При этом коронный разряд приобретает черты интенсивного поверхностного разряда, ток которого может регулироваться изменением положения вспомогательного электрода на внутренней поверхности диэлектрика.

В результате был получен стабильный тлеющий разряд в объёме  $V=2,2 \times 2,2 \times 88 \text{ (см}^3\text{)}=0,43 \text{ л}$  с энерговыделением до  $48 \text{ Дж}$  ( $W_{\text{уд}} \sim 220 \text{ Дж/л}\cdot\text{атм.}$ ).

Для возбуждения лазерной среды по предложенной схеме был разработан биполярный генератор высоковольтных импульсов, рис.3, с соответствующей

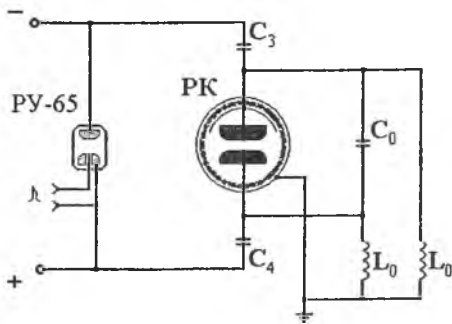


Рис.3. Схема возбуждения ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с коронной предыонизацией.

схемой зарядки. Данное решение позволяет организовать разрядный контур с низкой индуктивностью ( $L \sim 0,6 \text{ мкГн}$ ), что, в свою очередь, создает условие для формирования импульса тока накачки с длительностью  $\sim 0,5 \text{ мксек}$ . Кроме того, поскольку мощность, вкладываемая в поверхностный разряд, и, следовательно, интенсивность испускаемого им света в значительной мере определяется начальной скоростью изменения тока, а

$$\frac{dI}{dt} \sim \frac{V}{L},$$

то этот фактор оказывается существенным для получения

эффективной фотоионизации активного объема.

По результатам проведенных исследований была разработана и изготовлена действующая модель ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с предыонизацией УФ излучением от коронного разряда по поверхности диэлектрика. В главе приводятся описание установки и результаты исследований её параметров. Полученный пучок излучения имеет следующие характеристики:

апертура	$2 \times 2 \text{ см}^2$ ,
энергия в импульсе	до 6 Дж,
длительность импульса	$\sim 6 \text{ мксек}$ ,
частота следования	1-2 Гц.

Другой перспективной для получения широкоапертурных пучков излучения с однородным распределением энергии и с заданной плотностью является система возбуждения, в которой для предыонизации среды используется набор дискретных искровых разрядников. Этому направлению исследований посвящена **глава третья**. Здесь приведено сравнительное исследование двух вариантов возможного исполнения системы искровой предыонизации: система с последовательной двойной искрой и система параллельных разрядников с общей шиной питания. Определены их достоинства и недостатки, и выбрано оптимальное решение. Предпочтительнее выглядит система независимых разрядников с общей шиной питания, которая обеспечивает, благодаря возможности реализации опережающей коммутации ( $\Delta t \sim 0,5 \text{ мксек}$ ), более широкий диапазон осуществляемых энергокладов и лучшую эффективность преобразования энергии, рис.4.

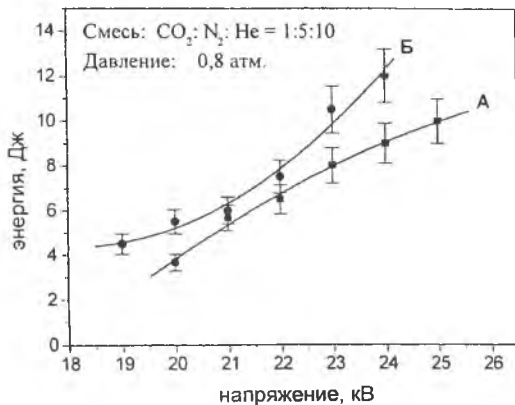


Рис. 4. Зависимость энергии импульса излучения от зарядного напряжения генератора с искровой предыонизацией: А-в виде последовательной двойной искры, Б-для системы независимых разрядников с опережающей коммутацией.

соответствии с преобразованием поля на поверхности катода, которое происходит при изменениях межэлектродного расстояния, рис. 5.

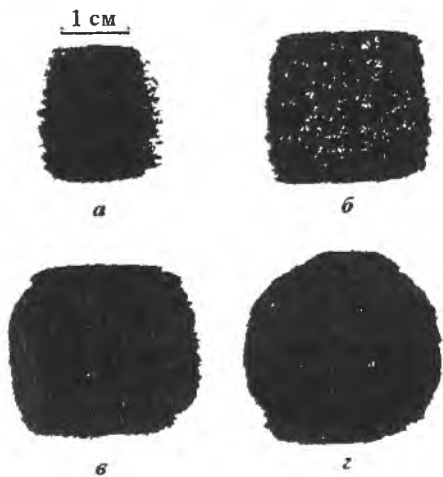


Рис. 5. Изменения апертюры пучка с изменением межэлектродного расстояния.

Для осуществления объёмно-однородного тлеющего разряда с требуемым энерговкладом необходимо осуществить профилирование электродов. В системе возбуждения с искровой предыонизацией впервые был апробирован электрод, спрофилированный по методу эквивалентных зарядов, описанному в главе 1.

Эксперименты продемонстрировали работоспособность и полезность данного метода в применении к задаче профилирования электродов ТЕА лазеров. Зафиксированные изменения апертюры пучка излучения свидетельствовали об изменении ширины области тлеющего разряда в определенном

Полученные результаты были использованы для разработки и создания экспериментального образца ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с искровой предыонизацией и поперечной прокачкой активной среды. В главе приводятся описание устройства лазера, результаты исследований его параметров, и их оптимизации.

Полученные пучки излучения характеризуются следующими параметрами:

- апертюра 30×20 мм,
- энергия в импульсе до 12 Дж,
- длительность импульса ~5 мкс,
- частота следования 1-10 Гц.

Исследование распределения энергии по поперечному сечению

пучка излучения, проведенных при высоте межэлектродного зазора в 28 мм показали, что эффективная ширина пучка, где наблюдаемая плотность энергии  $\sim 1 \text{ Дж/см}^2$  и выше, составляет порядка 20 мм при высоте 24 мм. При этом неоднородность в распределении энергии по высоте не превышала 6 %, а по ширине пучка наблюдаемое падение энергии от центра к краям составляло порядка 21 % от максимума. Непосредственные эксперименты по маркировке конкретных изделий продемонстрировали, что однородность распределения энергии по сечению достаточна для качественного отображения информации проекционным способом.

**Четвёртая глава** посвящена проблеме деградации рабочих смесей  $\text{CO}_2$ -лазеров и способам борьбы с данным явлением. Здесь кратко описаны основные методы, используемые в настоящее время для восстановления активной компоненты  $\text{CO}_2$ -сред. Приводится методика исследований

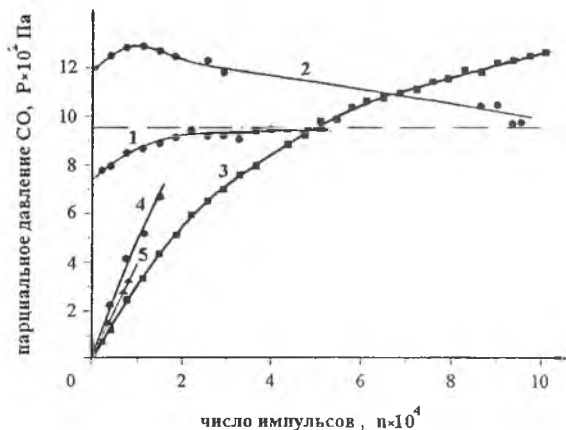


Рис.5. Динамика изменения парциального давления  $\text{CO}$  в рабочей смеси ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера для разных газовых добавок:

- 1 - порция  $\text{CO}$  ( $P_0 = 740 \text{ Па}$ ),
- 2 - порция  $\text{CO}$  ( $P_0 = 200 \text{ Па}$ ),
- 3 - порция  $\text{H}_2$  ( $P_0 = 4900 \text{ Па}$ ),
- 4 - наработка  $\text{CO}$  без добавок,
- 5 - порция  $\text{Xe}$  ( $P_0 = 490 \text{ Па}$ ).

состава активной среды ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера и полученные при этом результаты. В качестве исследуемого параметра выступала величина парциального давления оксида углерода, нарабатываемого в процессе возбуждения активной среды самостоятельным разрядом. На рис.5 представлены графики изменения содержания  $\text{CO}$  в рабочей среде лазера при введении различных газовых добавок, используемых в роли стабилизирующих компонентов. Одновременно фиксировалась энергия импульса выходного излучения, а так же отслеживались условия и характер протекания разряда накачки. В результате исследований получены конкретные количественные

рекомендации по стабилизации состава среды ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера. Оптимальной признана добавка в начальный состав смеси порции  $\text{CO}$ , которая позволяет сравнительно быстро получить динамическое равновесие в реакции

разложения и восстановления активной компоненты без нежелательных последствий для протекания самостоятельного разряда.

В заключении сделаны выводы и приведены основные результаты работы.

1. Исследование схемы предварительной ионизации среды ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера на основе поверхностного коронного разряда с применением беспотенциального вспомогательного электрода подтвердило, что данное решение является эффективным и перспективным для формирования самостоятельного объёмного тлеющего разряда. Система позволяет проводить масштабирование разрядной камеры и обеспечивает формирование однородного тлеющего разряда с удельным энерговыделением на уровне 220 Дж/л·атм.

2. Разработана и экспериментально апробирована схема биполярного генератора высоковольтных импульсов. Измерения параметров показали, что она отвечает основным требованиям, необходимым для возбуждения активных сред в ТЕА лазерах посредством самостоятельного объёмного тлеющего разряда, и обеспечивает ввод энергии за времена порядка  $\sim 0,5$  мксек.

3. Создана действующая модель ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с преионизацией ультрафиолетовым излучением поверхностного коронного разряда, которая позволяет формировать однородный пучок излучения с энергией в импульсе до 6 Дж, апертурой  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup>, частотой следования импульсов 1-2 Гц. Показано, что предложенная схема является перспективной для создания на её основе установки с широкоапертурным пучком излучения необходимой плотности энергии ( $\geq 1$  Дж/см<sup>2</sup>), обеспечивающей удельный энергосъём на уровне 27 Дж/л·атм. с эффективностью преобразования энергии 12 %.

4. Продемонстрирована возможность практического применения метода эквивалентных зарядов в расчётах профилей электродов ТЕА лазеров для систем типа профиль-плоскость.

5. Создан компактный экспериментальный образец ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера с искровой преионизацией, обладающий следующими характеристиками: энергия в импульсе излучения до 12 Дж, апертура пучка  $30 \times 20$  мм<sup>2</sup>, частота следования импульсов 1-10 Гц, КПД  $\sim 10$  %. Такие параметры обеспечивают качественное отображение информации проекционным способом.

Это позволяют рекомендовать представленный экспериментальный образец в качестве прототипа для создания технологической установки.

6. Экспериментально установлены количественные соотношения газовых добавок ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ), позволяющих осуществлять стабилизацию состава активной среды ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера. На основании полученных данных можно рекомендовать в качестве стабилизирующей добавки оксид углерода с парциальным давлением (15-18)% от давления  $\text{CO}_2$ . Полученные результаты послужили основанием для выбора 4-х компонентной смеси при разработке экспериментального образца ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера.

## Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Бакулин И.А., Котов Е.В., Николаев В.Д. ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазер с предыонизацией ультрафиолетовым излучением коронного разряда. // ПТЭ, 1997, №5, с.91-93.
2. Бакулин И.А., Котов Е.В., Николаев В.Д. Профиль электрода для импульсных лазеров высокого давления. // Известия СНЦ РАН, 2000, т.2, №1, с.44-47
3. Бакулин И.А., Котов Е.В., Николаев В.Д. Экспериментальный образец ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера для маркировки кабельной продукции. // Наука производству, 2000, №12 (37), с.16-17.
4. Бакулин И.А., Котов Е.В., Николаев В.Д. // X всероссийская конференция по физике газового разряда. Рязань, 2000, тезисы докладов, с.42-43.
5. Бакулин И.А., Казакевич В.С., Котов Е.В. ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазер для физического практикума. // VI уч.-метод. конференция стран содружества. 2000, -М., тезисы докладов, с.195-196.
6. Бакулин И.А., Котов Е.В., Николаев В.Д. О стабилизации рабочей смеси ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазера. // Известия СНЦ РАН, 2001, т.2, №1, с.44-47.
7. Бакулин И.А., Котов Е.В., Шалаев А.А. Аппаратура высокого давления с герметичным приводом. // Авторское свидетельство №1775802 А1, приоритет от 27.12..88. Бюл. № 42 от 15.11.92.
8. Бакулин И.А., Котов Е.В. Генератор импульсов высокого напряжения. // Заявка № 94015865/09, приоритет от 28.04.94. RU БИ № 15 от 27.05.96, с.124.