

На правах рукописи



ДО КУАНГ МАНЬ

**РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ CO₂-ЛАЗЕРОВ
С НАКАЧКОЙ ОБЪЕМНЫМ РАЗРЯДОМ
СВЕРХАТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Научный руководитель: **Козлов Борис Алексеевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Электронные приборы» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»,
г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

Официальные оппоненты: **Фирсов Константин Николаевич**,
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией «Физики импульсных газоразрядных лазеров» ФГБУН «Института общей физики имени А.М. Прохорова РАН»,
г. Москва, ул. Вавилова, д.38
Бочков Виктор Дмитриевич,
кандидат технических наук, директор
ООО «Импульсные технологии»,
г. Рязань, проезд Яблочкова, д. 5

Ведущая организация: ФГБУН «Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН», г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

Защита состоится «10» сентября 2019 г. в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», а также на сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.211.03, к.ф.-м.н., доцент



В.Г. Литвинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Формирование коротких импульсов излучения в ТЕА–СО₂ лазерах в форме одиночного пика с длительностью до 10 нс представляет интерес для лазерной локации, экологического мониторинга окружающей среды, тестирования фотоприемных устройств и систем в 10-ти микронной области длин волн, а также для устройств «ослепления» следящих систем военного назначения. Мощные ТЕА–СО₂ лазеры могут также успешно применяться для эффективной накачки газовых лазеров дальнего инфракрасного диапазона.

Формирование импульсов излучения с длительностью менее 10 нс в СО₂-лазерных смесях связано с увеличением давления активной среды до нескольких атмосфер, а также с применением специальных методов формирования излучения, таких как модуляция добротности резонатора или синхронизация мод. Эти методы достаточно сложны и, как правило, требуют применения управляемых оптических элементов с повышенной лучевой стойкостью.

В связи с этим является целесообразным изучение предельных возможностей традиционного для ТЕА–СО₂ лазеров метода формирования импульсов излучения путем «переключения усиления» с целью сокращения длительности до нескольких наносекунд. Суть метода заключается в том, что инверсная населенность в активной среде создается очень быстро и когерентное излучение формируется в условиях значительного превышения порогового значения инверсной населенности.

Для создания необходимого превышения инверсной населенности над пороговым значением за очень короткое время в активных средах ТЕА–СО₂ лазеров необходимо установление основных закономерностей и условий формирования объемных самостоятельных разрядов с большой плотностью тока и малой длительностью, в плазме которых происходит возбуждение рабочих уровней молекул двуокиси углерода и молекулярного азота.

Инициирование объемных разрядов при атмосферном давлении в большинстве случаев осуществляется с помощью достаточно простых и надежных электроразрядных устройств, генерирующих вакуумное ультрафиолетовое (ВУФ) излучение. При сверхатмосферном давлении возникает необходимость увеличения амплитуды возбуждающих импульсов и интенсивности ВУФ-излучения. В этих условиях инициирование объемных разрядов часто осуществляется с помощью рентгеновского излучения или пучков высокоэнергетичных электронов. Однако такие методы инициирования разрядов непригодны для создания малогабаритных ТЕА–СО₂ лазеров, поскольку они громоздки и требуют серьезной биологической защиты.

Цель настоящей работы заключается в создании действующих образцов малогабаритных CO_2 -лазеров, генерирующих импульсы излучения с длительностью менее 10 наносекунд.

Основные задачи диссертационного исследования. Для достижения цели необходимо было решить следующие основные задачи.

1. Теоретически определить условия достижения минимальных длительностей импульсов излучения в CO_2 -лазерах атмосферного и сверхатмосферного давлений.

2. Экспериментально определить условия формирования объемных разрядов накачки в CO_2 -лазерных смесях сверхатмосферного давления, обеспечивающих образование инверсной населенности с более чем десятикратным превышением порогового уровня за 10 – 70 нс.

3. Создать генераторы высоковольтных импульсов напряжения с амплитудой до 200 кВ и длительностью переднего фронта 10 – 20 нс при токах накачки более 1 кА и длительностью на полувысоте 10 – 30 нс.

4. Экспериментально установить условия наиболее полной передачи энергии от генератора накачки в активную среду малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера.

5. Теоретически оценить энергетические затраты на начальную ионизацию ВУФ-излучением при формировании объемных разрядов в CO_2 -лазерных смесях сверхатмосферного давления.

6. Экспериментально изучить поведение импульсов излучения в зависимости от параметров накачки, давления газовой смеси, компонентного состава и параметров резонатора ТЕ- CO_2 лазера.

7. Определить влияние температуры активной среды малогабаритного отпаянного ТЕА- CO_2 лазера на энергию излучения в импульсе.

Научная новизна определяется следующими полученными в работе результатами.

1. Установлены основные закономерности формирования объемных разрядов накачки в CO_2 -лазерных смесях сверхатмосферного давления, обеспечивающих образование инверсной населенности с многократным превышением порогового уровня в наносекундном диапазоне времени.

2. Впервые получены короткие (5 – 7) нс импульсы излучения с мощностью более 10 МВт в малогабаритном отпаянном ТЕ- CO_2 лазере без каких-либо дополнительных электрооптических устройств.

3. Впервые проведено комплексное исследование влияния температуры газовой среды в диапазоне от -28^0 С до $+60^0$ С на энергетические характеристики малогабаритного ТЕА- CO_2 лазера.

Практическая значимость диссертационной работы.

1. Заложены физические основы создания малогабаритных отпаянных ТЕА- CO_2 лазеров с длительностью импульсов излучения в не-

сколько наносекунд без применения дополнительных электрооптических элементов.

2. Созданы действующие образы малогабаритных отпаянных TE–CO₂ лазеров с энергией излучения в импульсе до 150 мДж при минимальной длительности импульсов (5 – 7) нс и импульсной мощностью излучения до 30 МВт.

3. Предложена и реализована трехэлектродная схема формирования объемного разряда сверхатмосферного давления с минимальными энергетическими затратами на начальную ионизацию ВУФ–излучением.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Минимальная длительность импульсов излучения (5 – 7) нс, генерируемых в малогабаритных TE–CO₂ лазерах с длиной резонатора (20 – 25) см в режиме «переключения усиления», достигается при более чем десятикратном превышении начальной инверсной населенности над пороговым значением в течение времени (5 – 20)· T_0 , где T_0 – время жизни фотонов в резонаторе.

2. Устойчивый объемный разряд накачки с минимальными энергетическими затратами на начальную ионизацию в CO₂–лазерных смесях сверхатмосферного давления формируется в трехэлектродной системе, состоящей из последовательно включенных вспомогательного и основного разрядных промежутков, в которой вспомогательный электрод расположен на расстоянии 0,3 – 0,5 см от основного разрядного промежутка, при приложении достаточного для пробоя основного газоразрядного промежутка высоковольтного импульса напряжения с временем нарастания не более 20 нс.

3. В малогабаритных TEА–CO₂ лазерах наиболее полная (около 90 %) передача энергии из генератора накачки в активную среду обеспечивается при использовании CO₂–лазерных смесей с содержанием гелия в интервале (50 – 80) % и общего содержания молекулярных компонентов в диапазоне (20 – 50) %.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на: VII Международной конференции «Импульсные лазеры на переходах в атомах и молекулах», 13–18 сентября, г. Томск, 2015 г.; XVII Международной конференции «Оптика лазеров», 27 июня – 1 июля 2016 г., г. Санкт-Петербург; XIII Международной конференции по импульсным лазерам и применениям лазеров AMPL–2017, 10–15 сентября 2017 г., г. Томск; XVIII Международной конференции «Оптика лазеров» ICLO 2018, 4–8 июня 2018 г., г. Санкт-Петербург; XXVI Международной конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте», 10–15 сентября 2018 г., г. Новороссийск.

Публикации. По итогам исследований опубликовано 16 работ, среди которых: 8 статей из перечня ВАК РФ рецензируемых научных журналов; 8 публикаций тезисов докладов на международных конференциях (из них 3 публикации входят в единую реферативную базу данных Scopus).

Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности: 05.27.02 – Вакуумная и плазменная электроника.

Структура работы. Диссертация содержит 141 страницу основного текста и состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 106 наименований и приложения. В диссертацию включено 3 таблицы и 60 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются актуальность темы диссертационного исследования, формулируются цель, задачи и приводятся основные положения, выносимые на защиту, описывается научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

В первой главе приводится обзор литературы. В ней рассмотрены закономерности формирования самостоятельных объемных разрядов в CO_2 -лазерных смесях при атмосферном и сверхатмосферном давлении. Анализ результатов, содержащихся в литературных источниках, позволил определить условия формирования объемных разрядов в плотных газах при использовании различных типов предионизаторов.

Рассмотрены известные методы получения импульсов лазерного излучения с длительностью несколько наносекунд. Наиболее простым из них является метод «переключения усиления», суть которого заключается в создании инверсной населенности, многократно превышающей пороговой уровень, за очень короткое время импульса накачки. Подробно рассматривается метод формирования объемного разряда при использовании ВУФ-излучения для предварительной ионизации рабочих газов в основном газоразрядном промежутке применительно к CO_2 -лазерам атмосферного (TEA-CO_2) и сверхатмосферного (TE-CO_2) давлений. На основе проведенного анализа сформулированы цель диссертационной работы и основные задачи исследований.

Во второй главе излагаются результаты численного моделирования процесса формирования импульсов излучения в CO_2 -лазерах атмосферного и сверхатмосферного давлений на основе механизма «переключения усиления». Теоретическая модель, описывающая изменения инверсной населенности и плотности фотонов в резонаторе TE-CO_2 лазера, составлена с учетом работы К. J. Andrews, Р. E. Dyer и D. J. James.

Диаграмма энергетических уровней молекул CO_2 и N_2 изображена на рисунке 2.1. На ней обозначены плотности заселенностей верхнего

(00⁰1) и нижних лазерных уровней (10⁰0, 02⁰0) и 01¹0 молекулы CO₂; N₄ – плотность заселенности колебательных уровней молекулы азота.

Система уравнений, описывающих динамику изменений населенностей и плотности фотонов в резонаторе:

$$\frac{dN_1}{dt} = K_1 N_{CO_2} N_e(t) - \gamma_{12} N_1 - \gamma_{14} N_1 + \gamma_{41} N_4 - I \sigma \frac{l}{L} (N_1 - N_2) \quad (1)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = K_2 N_{CO_2} N_e(t) + \gamma_{12} N_1 - \gamma_{23} N_2 - \gamma_{20} N_2 + I \sigma \frac{l}{L} (N_1 - N_2) \quad (2)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = K_3 N_{CO_2} N_e + \gamma_{23} N_2 - \gamma_{30} N_3 \quad (3)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = K_4 N_{N_2} N_e(t) + \gamma_{14} N_1 - \gamma_{41} N_4 \quad (4)$$

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I}{T_0} + I \sigma \frac{l}{L} (N_1 - N_2) + N_1 \frac{\sigma \cdot c}{V} \quad (5)$$

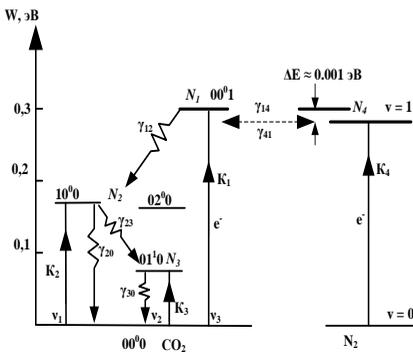


Рисунок 2.1 – Диаграмма колебательных уровней молекул CO₂ и N₂ в основном электронном состоянии

где N₁, N₂, N₃, N₄ – значения плотности заселенности указанных выше уровней, см⁻³; l – длина активной среды, см; L – длина резонатора, см; V – объем активной среды, см³; σ – сечение вынужденных переходов (см²), рассчитываемое по формуле:

$$\sigma = \frac{5 \cdot 10^{-17}}{(x + 0,73y + 0,64z)} \quad (6)$$

где x, y и z – парциальные давления CO₂, N₂ и He (Торр);

γ_{12} , γ_{23} , γ_{20} , γ_{30} – константы скоростей релаксации уровней (00⁰1), (10⁰0) и (01¹0) молекулы CO₂ (с⁻¹), которые рассчитываются по соотношениям:

$$\gamma_{12} = (365x + 110y + 85z)^{-1}; \quad \gamma_{23} = (1,5 \cdot 10^6 x + 6,3 \cdot 10^4 y + 7,2 \cdot 10^3 z)^{-1};$$

$$\gamma_{20} = (900x + 180y + 1,5 \cdot 10^2 z)^{-1}; \quad \gamma_{30} = (200x + 40y + 13270z)^{-1}.$$

Константы скоростей передачи возбуждения γ_{14} , γ_{41} между молекулами CO₂ и N₂ (с⁻¹) определяются формулами:

$$\gamma_{14} = (1,9 \cdot 10^4 \cdot y)^{-1}; \quad \gamma_{41} = (1,7 \cdot 10^4 \cdot x)^{-1},$$

K₁, K₂, K₃, K₄ – эффективные константы скоростей возбуждения электронным ударом верхних лазерных уровней молекулы CO₂ и первого колебательного уровня молекулы азота соответственно: K₁ = 6 · 10⁻⁹, K₂ = 5 · 10⁻⁹,

$$K_3 = 5 \cdot 10^{-9}; K_4 = 2 \cdot 10^{-8}, \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}.$$

Выходная мощность импульса лазерного излучения $P_{\text{вых}}$ и пороговое значение инверсии населенности $\Delta N_{\text{пор}}$ определяются следующими соотношениями:

$$P_{\text{вых}} = \frac{h\nu \cdot c}{2L} I \ln(1/R) \quad (7); \quad \Delta N_{\text{пор}} = \frac{1}{\sigma \cdot c \cdot T_0} = \frac{1}{2L\sigma} \ln(1/R) \quad (8)$$

где T_0 – время жизни фотонов в резонаторе лазера, с; I – плотность фотонов, фотон/см³; R – коэффициент отражения выходного зеркала;

Система уравнений (1) – (8) решалась методом Рунге–Кутты четвертого порядка в среде MathCAD. Полученные типичные расчетные зависимости инверсной населенности и плотности мощности излучения от времени при давлениях активной среды 1 атм. и 10 атм. представлены на рисунке 2.2.

Проведенные расчеты показывают, что для формирования импульсов излучения с длительностью менее 10 нс необходимо увеличивать отношение начального значения инверсной населенности к пороговому значению и использовать активные среды и оптические резонаторы с малой длиной. Заметно превысить начальную инверсную населенность над пороговым значением можно путем возбуждения активных сред при давлениях, значительно превышающих 1 атм. Увеличение давления газовой смеси в интервале (1 – 10) атм. ведёт к пропорциональному росту энергии излучения в импульсе и к уменьшению длительности импульсов излучения приблизительно до 6 нс. Минимальная длительность импульса излучения $\Delta t < 10$ нс достигается при длине резонатора $L = 20$ см, коэффициенте отражения выходного зеркала 50 % и общем давлении активной газовой среды до 10 атм.

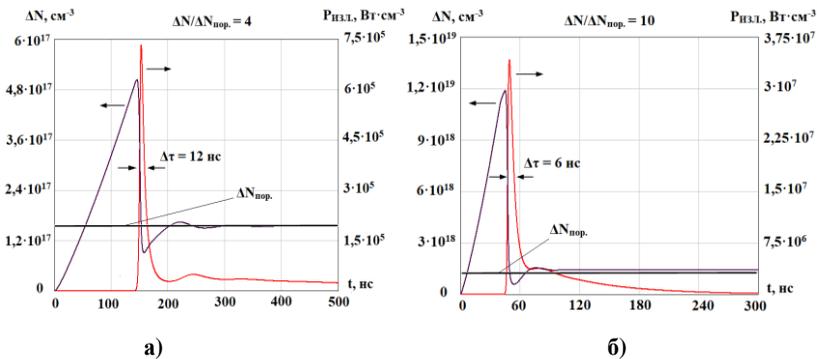


Рисунок 2.2 – Расчетные зависимости инверсии населенности ΔN и плотности мощности излучения $P_{\text{изл}}$ от времени для смеси CO₂:N₂:He = 1:1:4 при давлении 1 атм. (а) и 10 атм. (б)

В таблице 2.1 приведены расчетные значения порогового уровня инверсной населенности $\Delta N_{пор.}$, коэффициентов потерь резонатора K и уровня инверсной населенности ΔN , превышающей в 10 раз пороговое значение ΔN . Эти данные получены для $\text{CO}_2\text{:N}_2\text{:He} = 1\text{:}1\text{:}4$ при полном давлении рабочей газовой смеси 10 атм. и длине резонатора $L = 20$ см для различных значений коэффициента отражения выходного зеркала резонатора R в интервале (50 – 90) %.

Таблица 2.1.

$R, \%$	50	60	70	80	90
$\Delta N_{пор.}, \text{см}^{-3}$	$2 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$9,7 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{17}$	$2,8 \cdot 10^{17}$
$K = \Delta N_{пор.} \sigma, \text{см}^{-1}$	$20 \cdot 10^{-3}$	$13 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$
$\Delta N = 10 \cdot \Delta N_{пор.}, \text{см}^{-3}$	$2 \cdot 10^{19}$	$1,4 \cdot 10^{19}$	$9,7 \cdot 10^{18}$	$6 \cdot 10^{18}$	$2,8 \cdot 10^{18}$

В режиме «переключения усиления» накачка объемным разрядом должна осуществляться за очень короткое время со скоростью заселения верхнего уровня молекул CO_2 (00^0_1) электронным ударом $dN_{001} / dt \approx K_1 N_{\text{CO}_2} N_e \approx 3 \cdot 10^{26} \text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Необходимые значения инверсии населенностей ΔN , определяющиеся произведением скорости заселения на время накачки $t_{нак.}$, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

$t_{нак.}, \text{нс}$	10	20	30	40	50	60	70
$\Delta N, \text{см}^{-3}$	$3 \cdot 10^{18}$	$6 \cdot 10^{18}$	$9 \cdot 10^{18}$	$1,2 \cdot 10^{19}$	$1,5 \cdot 10^{19}$	$1,8 \cdot 10^{19}$	$2,1 \cdot 10^{19}$

Плотность тока объемного разряда связана с концентрацией электронов в плазме соотношением:

$$j = e \cdot N_e \cdot v_{оп} = e \cdot N_e \cdot 2,75 \cdot 10^6 (1 + 0,455 \cdot E / N). \quad (9)$$

Для типичных значений высоковольтного напряжения на промежутке $U_{AK} = (18 - 20)$ кВ и расстояния $d_{AK} = 0,8$ см напряженность поля $E = (22,5 \cdot 10^3 - 25 \cdot 10^3)$ В/см. Величина $E/N = (8,4 \cdot 10^{-16} - 9,3 \cdot 10^{-16})$ В·см², и скорость дрейфа электронов $v_{оп} \approx 3 \cdot 10^6$ см/с, что соответствует плотности тока накачки 480 А/см².

Расчетные результаты, представленные в таблицах 2.1 и 2.2, позволяют оценивать необходимую плотность тока накачки. Например, при использовании выходного зеркала с коэффициентом отражения 50 % для превышения инверсии населенности над пороговым уровнем в 10 раз накачка должна осуществляться в течение времени (10 – 70) нс

со скоростью заселения верхнего уровня не менее $3 \cdot 10^{26} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$. Такая скорость может быть обеспечена лишь при сравнительно большой величине плотности тока накачки 480 А/см^2 .

В третьей главе приводятся результаты теоретического исследования начальной стадии формирования объемного разряда накачки и определения интервала времени его существования.

Для формирования пространственно однородных объемных разрядов сверхатмосферного давления в разрядном промежутке до момента пробоя должна быть обеспечена достаточно высокая начальная концентрация свободных электронов ($10^6 - 10^9$) см^{-3} .

Концентрация фотоэлектронов N_e , создаваемых ВУФ-излучением, на некотором расстоянии от r источника определяется соотношением:

$$N_e = N_{\text{им}} \cdot \Omega \cdot J_0 \cdot \exp(-k_{\text{полг}} \cdot P_{\Sigma} \cdot r), \quad (10)$$

где $N_{\text{им}}$ – концентрация молекул, ионизируемых ВУФ-излучением; J_0 – сила света источника излучения в области (115 – 120) нм; $k_{\text{полг}}$ – коэффициент поглощения излучения молекулами рабочей смеси; P_{Σ} – общее давление газовой смеси; r – расстояние между источником и межэлектродным промежутком для зажигания объемного разряда; Ω – телесный угол.

Функция $J_0 \cdot \Omega \cdot \exp(-k_{\text{полг}} \cdot P_{\Sigma} \cdot r)$ в выражении (10) – это «закон Бугера» для расходящихся оптических пучков с телесным углом в поглощающей среде, определяющий интенсивность излучения на удалении r от источника.

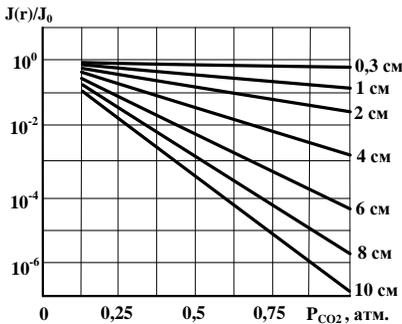


Рисунок 3.1 – Зависимости относительной интенсивности поглощаемого излучения от парциального давления CO_2 при различных удалениях разряда от источника

давления CO_2 в рабочих смесях и с ростом расстояния от источника излучения до основного промежутка. С практической точки зрения важно, что при приближении источника к основному промежутку на

На рисунке 3.1 показаны расчетные зависимости относительной интенсивности поглощаемого ВУФ-излучения от парциального давления CO_2 при различных расстояниях между источником и разрядным промежутком.

Как видно на рисунке и следует из выражения (10), интенсивность ионизирующего излучения, поглощаемого в основном разрядном промежутке, уменьшается по экспоненциальному закону с увеличением парциального

расстояние (0,3 – 0,5) см интенсивность поглощаемого излучения уменьшается незначительно.

Пропорционально интенсивности изменяются и энергетические затраты на начальную ионизацию. Они минимальны при расположении предионизатора (источника ВУФ–излучения) в непосредственной близости к основному разрядному промежутку. Удаление источника от зоны возбуждения объемного разряда, например на 10 см, увеличивает энергетические затраты на начальную ионизацию на несколько порядков. В результате они становятся соизмеримыми с энергией накачки и могут даже превышать её.

Напряжение пробоя основного разрядного промежутка пропорционально увеличивается с возрастанием давления рабочей газовой смеси. При расстоянии между электродами $d_{AK} = 0,8$ см повышение давления от 1 атм. до 10 атм. требует увеличения амплитуды высоковольтного импульса накачки с 20 кВ до 140 кВ для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$. Для состава смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$ пробивное напряжение увеличиваются в ещё большей степени – до 200 кВ.

Характерной особенностью объемного разряда в CO_2 –лазерных смесях высокого давления является ограниченное время горения, спустя которое разряд локализуется в виде каналов и становится непригодным для целей накачки. Наиболее важными механизмами локализации разряда при атмосферном и сверхатмосферном давлении являются «перегревно-ионизационная», взрывная, «прилипательная» и химико-ионизационная неустойчивости. Расчетные результаты показали, что наиболее медленно образование локальной неоднородности происходит по механизму химико-ионизационной неустойчивости с характерным временем развития в интервале (25 – 200) мкс. Типичные значения времени развития других видов локализации разряда намного меньше и при давлении 1 атм. находятся в пределах (50 – 150) нс. Повышение давления до 10 атм. уменьшает время развития локального разряда до ~15 нс. Эти данные указывают на необходимость формирования импульса тока накачки в пределах 15 нс.

В четвертой главе дано описание двух вариантов конструкций активных элементов малогабаритных TE-CO_2 лазеров, экспериментальной установки, на которой проводились исследования, генераторов высоковольтных (до 200 кВ) импульсов напряжения наносекундной длительности и методов измерения параметров объемного разряда и импульсов излучения.

Схематические изображения внутренней арматуры активных элементов представлены на рисунке 4.1. Внутренние части оболочек приборов изготовлены из керамики 22ХС цилиндрической формы с длинами 340 мм и 200 мм. Внутренний диаметр цилиндров составлял 70

мм, толщина стенок – 5 мм. Механическая прочность активных элементов, которые должны выдерживать рабочие давления до 10 атм., обеспечивалась внешними металлическими оболочками. Пространство между цилиндрической оболочкой из керамики и внешней металлической оболочкой заливалось эпоксидной смолой. Такая конструкция выдерживала испытательные давления до 20 атм. Геометрические размеры зон возбуждения объемных разрядов – $18 \times 0,8 \times 0,8 \text{ см}^3$ и $7 \times 0,8 \times 0,8 \text{ см}^3$. Линейные размеры резонаторов – 34 см и 20 см.

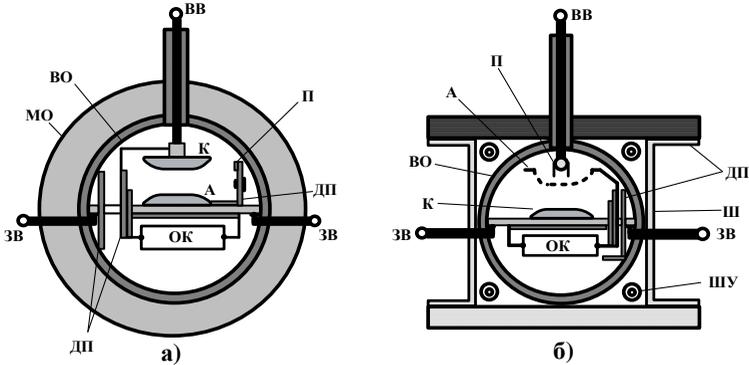


Рисунок 4.1– Схематические изображения двух вариантов активных элементов TEA–CO₂ лазеров: объем разрядной зоны $V_{AK1} = 18 \times 0,8 \times 0,8 \text{ см}^3$, длина резонатора $L_1 = 34 \text{ см}$ (а) и $V_{AK2} = 7 \times 0,8 \times 0,8 \text{ см}^3$, $L_2 = 20 \text{ см}$ (б)

На рисунке 4.1 применены следующие обозначения: А и К – анод и катод основного разрядного промежутка; П – предионизатор; ВЭ – вспомогательный электрод; ВВ – высоковольтный ввод; ОК – обостряющие конденсаторы; ДП – диэлектрические пластины (керамика 22ХС); ВО – внутренняя оболочка (керамика 22ХС); МО – металлическая оболочка; Ш – алюминиевый швеллер; ОАЭ – основание активного элемента; УШ – удерживающие шпильки; ЗВ – «земляные» выводы.

Конструкция активного элемента первого варианта (рис. 4.1, а) содержит два электроразрядных устройства. Одно из них образовано протяженными (18 см) монолитными профилированными никелевыми электродами А и К, между которыми возбуждается основной объемный разряд и создается активная среда для генерации лазерного излучения. Межэлектродное расстояние 0,8 см. Другое устройство служит для зажигания вспомогательного поверхностного разряда (предионизатор П), который является источником ВУФ–излучения, осуществляющего начальную ионизацию газовой смеси в основном промежутке. Предионизатор расположен от центра основного разрядного промежутка на сравнительно небольшом (2,5 см) расстоянии. Поверхностные разряды зажигаются вдоль всего основного промежутка.



а)



б)

Рисунок 4.2 – Внешний вид активных элементов с длиной резонатора $L = 20$ см – (а) и $L = 46$ см – (б)

основной разряды. Основной недостаток конструкции активного элемента связан со сравнительно низкой электрической прочностью между электродами основного и вспомогательного промежутков, не позволяющей увеличивать амплитуду импульса напряжения выше 60 кВ. При более высоком напряжении происходит пробой между катодом основного промежутка и электродами преионизатора.

Во втором варианте активного элемента (рис. 4.1, б) используются



а)



б)

$U = 80$ кВ

$U = 100$ кВ

$U = 120$ кВ

Рисунок 4.3 – Высоковольтный генератор (а) и разрядники–обострители (б)

ных импульсов, выполненные на основе импульсных трансформаторов с замкнутым и разомкнутым магнитопроводами на напряжения 80 ÷ 200

Достоинством такой конструкции активного элемента является возможность независимым образом изменять электрические параметры высоковольтных импульсов, возбуждающих вспомогательный и

вспомогательные искровые разряды, возбуждаемые в непосредственной близости от сеточного анода (на расстоянии 0,3 см). Такое решение обеспечивает минимизацию затрат энергии на начальную ионизацию. Кроме этого, вспомогательные разряды после пробоя основного разрядного промежутка поддерживаются его большим током в течение всего времени накачки.

При проведении исследований по формированию объемного разряда накачки в CO_2 -лазерных смесях сверхатмосферного давления применялись генераторы высоковольтных

кВ с очень малой (до 10 нс) длительностью переднего фронта (рис 4.3, а). Малое время нарастания напряжения достигалось благодаря использованию в генераторах искровых разрядников–обострителей высокого давления с временем коммутации менее 1 нс (рис. 4.3, б).

Для измерения параметров импульсов напряжения и тока объемного разряда применялись делители напряжения и трансформаторы тока, которые позволяли регистрировать параметры с наносекундным разрешением. Общая погрешность измерения напряжения и тока составляла $\pm 5\%$ и ограничивалась погрешностью применявшихся осциллографов С1–75 ($\Delta f = 250$ МГц) и АКИП–4115/3А ($\Delta f = 70$ МГц).

В пятой главе приводятся результаты экспериментальных исследований совокупности процессов, определяющих энергетические параметры малогабаритных ТЕ–СО₂ лазеров. Исследования включали в себя изучение энергетических и временных характеристик объемных самостоятельных разрядов при сверхатмосферных давлениях и импульсов лазерного излучения для различных вариантов конструкций газоразрядных модулей. Изучалось также влияние углеродных покрытий рабочих электродов на значения тока накачки, энергии накачки и энергии лазерного излучения в импульсе.

На рисунке 5.1 представлены экспериментальные зависимости энергетических затрат на начальную ионизацию в преионизаторе с поверхностным разрядом и напряжения пробоя основного разрядного промежутка от полного давления рабочей газовой смеси в диапазоне от 1 атм. до 6 атм. при различных соотношениях СО₂:N₂:He.

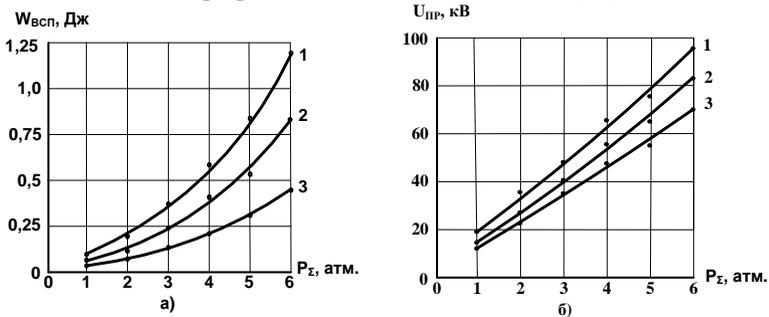


Рисунок 5.1 – Зависимости энергетических затрат на начальную ионизацию (а) и напряжения пробоя разрядного промежутка (б) от общего давления газовых смесей: 1 – СО₂:N₂:He = 1:1:3; 2 – СО₂:N₂:He = 1:1:4; 3 – СО₂:N₂:He = 1:1:6

Из приведённых графиков следует, что величина энергии, рассеиваемой в плазме вспомогательного разряда, повышается с ростом давления. Для рабочей смеси СО₂:N₂:He = 1:1:3 при повышении давления рабочей смеси от 1 до 6 атм. энергия, затрачиваемая на начальную ио-

низацию, увеличивается от 0,1 Дж до 1,2 Дж. Более высокие значения потребляемой энергии наблюдаются в рабочих газовых смесях, обогащённых двуокисью углерода и азотом.

Напряжение пробоя линейно увеличивается с ростом давления газа. Для смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:3$ при повышении давления от 1 атм. до 6 атм. пробивное напряжение растёт от (18 – 20) кВ до (75 – 100) кВ. Для этой смеси в экспериментах регистрировались наиболее высокие значения напряжения пробоя.

Экспериментально установлены основные взаимосвязи эффективности передачи энергии накачки от импульсного генератора в активную среду малогабаритного ТЕ– CO_2 лазера с химическим составом рабочей смеси и с амплитудой импульса напряжения накачки. Максимальные значения эффективности передачи энергии в плазму объемного разряда в CO_2 –лазерных смесях при атмосферном давлении находятся в пределах от 95 % (смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:2$) до 85 % (смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:8$).

При изучении возможности увеличения вклада автоэлектронного тока с катода в общий ток разряда накачки и достижения более высоких значений плотности тока и энергии накачки проведено исследование роли углеродной сажи, которая наносилась на поверхность никелевого катода. Покрытие электродов углеродной сажей существенно (в 1,6 – 2 раза) повышает плотность тока и способствует увеличению в 1,4 раза энергии излучения в импульсе.

В таблице 5.1 для двух вариантов исследованных активных элементов малогабаритных ТЕ– CO_2 лазеров сверхатмосферного давления (рис. 4.1) приведены полученные в экспериментах значения энергии излучения в импульсе $W_{изл}$, максимальной мощности лазерного излучения $P_{изл}$ и длительности импульсов на полувысоте $\tau_{изл}$ для двух величин общего давления P_{Σ} (1 атм. и 6 атм.) рабочей газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:2$.

Таблица 5.1 – Основные параметры импульсов лазерного излучения.

Активные элементы	P_{Σ} , атм	$W_{изл}$, мДж	$P_{изл}$, МВт	$\tau_{изл}$, нс
Вариант 1, $18 \times 0,8 \times 0,8 \text{ см}^3$, $L = 34 \text{ см}$	1	45 – 60	1 – 1,7	45 – 50
	6	500 – 880	33 – 73	12 – 15
Вариант 2, $7 \times 0,8 \times 0,8 \text{ см}^3$, $L = 20 \text{ см}$	1	15 – 25	0,4 – 0,8	30 – 40
	6	80 – 130	11,5 – 26	5 – 7

Представленные в таблице 5.1 данные подтверждают практическую значимость принципов построения малогабаритных ТЕ– CO_2 ла-

зеров сверхатмосферного давления, разработанных в ходе выполнения диссертационной работы. Они позволили получить высокие значения энергии излучения в импульсе (почти до 1 Дж) и мощности излучения (до 73 МВт), а также значительно (до 5 – 7 нс) уменьшить длительность импульса излучения.

На рисунке 5.2 представлены типичные осциллограммы сигнала фотоприемника ФП–1 с чувствительностью 1,33 мВ/кВт при поступлении импульсов излучения малогабаритного лазера для газовых смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$ (а) и $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 2:1:4$ (б) при общем давлении газовой среды в 1 атм.

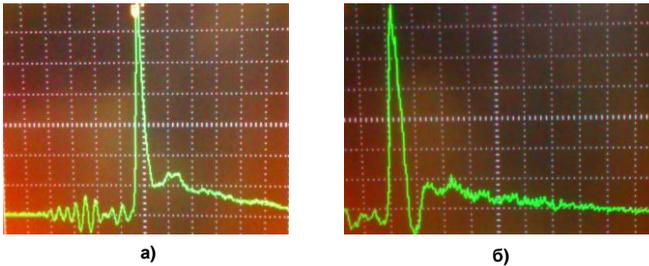


Рисунок 5.2 – Типичная форма импульса лазерного излучения для рабочей смеси: а – $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:4$; б – $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 2:1:4$

Видно, что импульс излучения имеет сложную структуру. В начальный момент излучение высвечивается в форме «гигантского» импульса, после которого наблюдается достаточно продолжительный «хвост». Для смеси с повышением содержанием двуокиси углерода преобладает (рис. 5.2, б) «хвост» выражен слабее, чем на рисунке 5.2, а. Эту тенденцию подтвердили дополнительные эксперименты, которые показали что при использовании смесей $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}$ с $\text{CO}_2:\text{N}_2 = 3:1 \div 5:1$ импульсы лазерного излучения формируются в виде «гигантского» пика без характерного для ТЕА– CO_2 лазеров «хвоста».

Экспериментальное исследование влияния температуры активной среды малогабаритного ТЕА– CO_2 лазера на его параметры показало, что рост температуры от -28°C до $+60^\circ\text{C}$ вызывает существенное (примерно на порядок) падение энергии излучения в импульсе [от (45 – 60) мДж до (3 – 5) мДж] из-за резкого уменьшения инверсии населенностей в зоне генерации. Рабочая газовая смесь может нагреваться не только при повышении температуры окружающей среды, но и за счет большой плотности тока объемного разряда. Поэтому представляется целесообразным исследовать возможность устранения негативного влияния нагрева активной среды путем принудительного охлаждения активных элементов разработанных лазеров с помощью, например, термоэлементов Пельтье.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы:

1. Обоснована и развита теоретическая модель, позволяющая описывать процесс генерации импульсов излучения в CO_2 -лазерных смесях атмосферного и сверхатмосферного давлений на основе механизма «переключения усиления».

2. Выявлены и сформулированы условия получения импульсов излучения в форме одиночного пика наносекундной длительности: десятикратное превышение инверсии населенности над пороговым уровнем; обеспечение малой длительности импульса тока накачки (10 – 70) нс; высокое (до 10 атм.) давление рабочей газовой смеси; малая (20 см) длина резонатора; низкий (50 %) коэффициент отражения выходного зеркала резонатора; соотношение молекулярных компонентов CO_2 и N_2 в газовой смеси в пределах 3:1 – 5:1.

3. Экспериментальным путем установлено, что напряжение пробоа промежутка и напряжение горения объемного разряда в CO_2 -лазерных смесях линейно увеличиваются с ростом давления газа и величины разрядного промежутка. Для газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:6 - 1:1:4$ при полном давлении 10 атм. и величине межэлектродного промежутка $d_{\text{ЭК}} = 0,8$ см пробивное напряжение достигает значения (180 – 200) кВ.

4. Показано экспериментально, что максимальная эффективность передачи энергии от генератора накачки в активную среду ТЕА- CO_2 лазера (85 – 95) % достигается при использовании газовых смесей, содержащих (50 – 80) % гелия.

5. Предложен способ повышения плотности тока объемного разряда накачки и энергии излучения в импульсе путем увеличения автоэлектронного тока с катода за счет нанесения на его поверхность покрытия из углеродной сажи. Установлено, что при напряжении 24 кВ нанесение покрытия увеличивает плотность тока от (110 – 180) A/cm^2 до (250 – 320) A/cm^2 , а значения энергии излучения в импульсе возрастают в 1,4 раза.

6. В малогабаритном отпаянном ТЕ- CO_2 лазере с объемом зоны возбуждения разряда $7 \times 0,8 \times 0,8$ cm^3 и длиной резонатора 20 см достигнута наименьшая длительность импульсов излучения (5 – 7) нс при энергии излучения в импульсе до 130 мДж и мощности до 26 МВт.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. До, К.М. О влиянии метода охлаждения на энергетические параметры импульсов излучения малогабаритных ТЕА- CO_2 лазеров / К.М. До, Б.А. Козлов, А.Б. Ястребков // Вестник РГРТУ. № 3. Вып. 53. 2015. С. 139–143.

2. До, К.М. Генерационные характеристики малогабаритного ТЕА–СО₂ лазера при охлаждении до –28 °С / К.М. До, Б.А. Козлов // Вестник РГРТУ. № 2. Вып. 64. 2018. С. 116–121.

3. До, К.М. О влиянии добавок ксенона на скорость «электрического ветра» в СО₂–лазерных смесях атмосферного давления / К.М. До, Б.А. Козлов // Вестник РГРТУ. № 2. Вып. 64. 2018. С. 122–127.

4. До, К.М. Эффективность передачи энергии из импульсного генератора накачки в активную среду малогабаритного ТЕА–СО₂ лазера / К.М. До, Б.А. Козлов // Вестник РГРТУ. № 3. Вып. 65. 2018. С. 150–155.

5. До, К.М. Исследование начальной стадии формирования объемного разряда накачки в малогабаритном ТЕА–СО₂ лазере / К.М. До, Б.А. Козлов // Вестник РГРТУ. № 3. Вып. 65. 2018. С. 156–163.

6. До, К.М. Исследование генерационных характеристик малогабаритного ТЕА–СО₂ лазера / К.М. До, Б.А. Козлов // Вестник РГРТУ. № 4. Вып. 66. Часть 2. 2018. С. 69–76.

7. До, К.М. О роли углеродной сажи в формировании объемного разряда в накачки в СО₂–лазерных смесях атмосферного давления / К.М. До, Б.А. Козлов, Т.Н. Май // Вестник РГРТУ. № 4. Вып. 66. Часть 2. 2018. С. 77–81.

8. До, К.М. Ресурс малогабаритных отпаянных ТЕА–СО₂ лазеров / К.М. До, Б. А. Козлов, Т.Н. Май // Вестник РГРТУ. № 4. Вып. 67. 2019. С. 126–133.

Издания, входящие в базу цитирования Scopus:

9. Do, Q.M. Super–atmospheric metal–ceramic small–sized sealed–off TE–СО₂ laser with PRR up to 25 Hz / B.A. Kozlov, Q.M. Do // Laser optics. 17th International conference. 2016. St. Petersburg, Russia, 27 June – 1 July 2016. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7549706/>.

10. Do, Q.M. Nanocarbon coating cathodes and energetic parameters of small–size TEА–СО₂ lasers / Q.M. Do, B.A. Kozlov, T.N. Mai // Laser optics. 18th International conference. 2018. St. Petersburg, Russia, 4–8 June 2018. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8435238/>.

11. Do, Q.M. Pulse–periodical super–atmospheric pressures TE–СО₂ lasers with «electrical wind» / Q.M. Do, B.A. Kozlov // Laser optics. 18th International conference. 2018. St. Petersburg, Russia, 4–8 June 2018 <https://ieeexplore.ieee.org/document/8435205/>.

Тезисы докладов конференций

12. До, К.М. ТЕ–СО₂ лазер с длительностью импульсов излучения менее 10 наносекунд / К.М. До, Б.А. Козлов, А.Б. Ястребков // XII Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул», 13–18 сентября 2015 г, г. Томск.

13. До, К.М. Схемы лазерной накачки молекулярных сред для

генерации излучения в ТГц диапазоне / М.Е. Деев, Б.А. Козлов, А.Б. Ястребков, К.М. До, Ю.С. Шувариков // XII Международная конференция «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул», 13–18 сентября 2015 г, г. Томск.

14 Do, Q.M. Characteristics of a small sized TEA–CO₂ laser with carbon coatings cathodes / Q.M. Do, B.A. Kozlov, T.N. Mai, N.S. Kulikov // Book of Abstracts International Conference AMPL. Tomsk, Russia. 2017. P. 37.

15 Do, Q.M. TEA–CO₂ laser with a modified method of pumping / Q.M. Do, T.N. Mai, B.A. Kozlov, N.S. Kulikov, D.G. Filon // Book of Abstracts International Conference AMPL. Tomsk, Russia. 2017. P. 38.

16 До, К.М. Малогабаритный отпаянный импульсно–периодический TEA–CO₂ лазер для экологических применений / К.М. До, Т.Н. Май, Б.А. Козлов, А.Б. Ястребков // XXVI Международная Конференция «Лазерно–информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте. Сентябрь 2018, Новороссийск». С. 65–66.

ДО КУАНГ МАНЬ

РАЗРАБОТКА МАЛОГАБАРИТНЫХ СО₂–ЛАЗЕРОВ С НАКАЧКОЙ ОБЪЕМНЫМ РАЗРЯДОМ СВЕРХАТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.07.2019. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В.Ф. Уткина.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.