

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П.Н. Лебедева
Российской академии наук

На правах рукописи

Козлов Андрей Юрьевич

**Лазер на основных и обертоновых переходах молекулы СО
с накачкой щелевым высокочастотным разрядом
и криогенным охлаждением электродов**

специальность 01.04.21 лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2017

Работа выполнена в Отделении квантовой радиофизики им. Н.Г. Басова Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор Ионин Андрей Алексеевич, руководитель Отделения квантовой радиофизики ФИАН.

Научный консультант: кандидат физико-математических наук, доцент Сеницын Дмитрий Васильевич, старший научный сотрудник ФИАН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Гурашвили Виктор Арчелович, начальник отдела мощных лазеров Государственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований (ГНЦ РФ ТРИНИТИ);

кандидат физико-математических наук Минеев Александр Петрович, зам. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук (ИОФ РАН).

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”.

Защита диссертации состоится 18 декабря 2017 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский просп., д.53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук и на сайте www.lebedev.ru

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

А.С. Золотко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Среди молекулярных лазеров, действующих в средней инфракрасной области спектра, лазеры на окиси углерода [1, 2] выделяются высокой эффективностью и широким диапазоном перестройки частоты излучения. Генерация излучения в таких лазерах может происходить как на фундаментальных (основных) колебательно-вращательных переходах с изменением номера колебательного уровня V на единицу ($V+1 \rightarrow V$) в диапазоне длин волн от ~ 4.6 мкм [3] до ~ 8.7 мкм [4], так и на переходах первого колебательного обертона ($V+2 \rightarrow V$) молекулы CO в диапазоне длин волн от ~ 2.5 мкм до ~ 4.2 мкм [5].

Диапазон перестройки длин волн излучения CO лазера перекрывает спектральные интервалы, в которых расположены полосы поглощения как многих обычных веществ и органических соединений, так и различных загрязнителей, включая опасные (токсичные и взрывчатые) вещества [6, 7]. Кроме того, рабочий спектральный диапазон обертонового CO лазера перекрывает “окно прозрачности” атмосферы (спектральная область с малым поглощением) в диапазоне от 3.3 до 4.1 мкм. Сочетание большого количества спектральных линий, высокой стабильности частоты излучения и малой спектральной ширины отдельной линии открывает широкие возможности по применению обертонового CO лазера в спектроскопии, при дистанционном лазерном зондировании и мониторинге окружающей среды, транспортировке лазерного излучения на большие расстояния и др. А проведенная в работе [8] сравнительная многофакторная оценка диагностических возможностей различных газовых лазеров среднего ИК диапазона (CO_2 , HF, DF, NH_3 , N_2O и CO) показала, что широкодиапазонный CO лазер обладает уникальными возможностями в многочастотной спектроскопической диагностике загрязнений атмосферы, в том числе выхлопами двигателей внутреннего сгорания.

Наилучшие спектральные и энергетические характеристики CO лазеров были получены при охлаждении активной среды до криогенных температур [2]. Особенно актуально криогенное охлаждение для получения генерации в обертоновом CO лазере [5]. Криогенное охлаждение в газовых лазерах достигается либо при расширении газа в сверхзвуковом потоке в больших установках, либо при диффузионном охлаждении через стенки разрядной камеры или другие элементы, охлаждаемые жидким азотом. Обеспечить высокую эффективность диффузионного охлаждения позволяет щелевая геометрия области газового разряда, при которой охлаждение происходит через поверхность охлаждаемых электродов. При такой конфигурации достигаются наименьшие среди газоразрядных лазеров габариты установок при высокой мощности

излучения. Щелевые лазеры накачиваются высокочастотным (ВЧ) разрядом, который позволяет возбуждать активную среду при давлениях до сотен Торр без использования источников внешней ионизации [9].

Большинство экспериментальных исследований СО лазеров с накачкой ВЧ разрядом проводилось при температуре активной среды не ниже -30°C . Исключением являются всего несколько работ [10-12], а генерация излучения на обертоновых переходах молекулы СО в установке с ВЧ накачкой наблюдалась только в работе [12] в узком спектральном диапазоне при охлаждении активной среды в сверхзвуковом потоке. Щелевых лазеров с накачкой ВЧ разрядом, действующих на обертоновых переходах молекулы СО, до настоящего времени не существовало. Криогенные СО лазеры без прокачки активной среды практически никто не исследовал, потому что считалось, что такой лазер не может работать сколько-нибудь долгое время из-за быстрой деградации активной среды. При низких температурах продукты распада молекул СО в плазмохимических реакциях (углерод и CO_2) вымораживаются на холодных элементах установки, и не могут участвовать в обратных реакциях, восстанавливающих активные частицы, как это происходит при более высоких температурах. Поэтому криогенные СО лазеры ранее работали только либо с прокачкой газовой смеси, либо в моноимпульсном режиме [2, 5].

В связи с этим, несомненна актуальность представленных в диссертации исследований, которые посвящены вопросам определения основных физических принципов и механизмов, позволяющих создавать надежные компактные источники когерентного ИК излучения на основе щелевых СО лазеров с ВЧ накачкой и криогенно охлаждаемыми электродными системами, действующими без прокачки активной среды. Особое внимание при этом уделено максимально возможному расширению диапазонов выходных параметров этих источников (спектральный диапазон, выходная мощность, эффективность и ресурс работы) и обеспечению их стабильности, в частности, путем поиска путей минимизации влияния криогенных плазмохимических процессов, ведущих к деградации активной среды.

Цель работы и решаемые задачи.

Целью диссертационной работы являлась разработка и создание компактных щелевых СО лазеров с возбуждением высокочастотным разрядом и криогенным охлаждением электродов, действующих как на основных, так и на обертоновых переходах молекулы СО длительное время без принудительной прокачки газовой смеси.

В результате проведенных в рамках настоящей диссертации исследований были решены следующие задачи:

1. Создание компактных (с активным объемом $\sim 10\text{-}20\text{ см}^3$) щелевых лазеров с накачкой поперечным емкостным ВЧ разрядом и криогенным охлаждением электродов, действующих без принудительной замены активной среды, как на основных, так и на обертоновых переходах молекулы СО в непрерывном, квазинепрерывном и импульсно-периодическом режимах.

2. Экспериментальное исследование этих лазеров с целью определения параметров накачки, давления и состава активной среды, позволяющих получить наибольшую среднюю мощность лазерного излучения или максимально увеличить ресурс работы криогенных щелевых СО лазеров без принудительной прокачки лазерной смеси.

3. Получение генерации излучения в щелевых СО лазерах с накачкой ВЧ разрядом и охлаждением электродов жидким азотом, действующих без принудительной прокачки активной среды в непрерывном и импульсно-периодическом режимах с частотами повторения импульсов от 10 Гц до $\sim 10\text{ кГц}$.

Научная новизна

1. Показано, что компактные щелевые СО лазеры с накачкой импульсно-периодическим поперечным емкостным ВЧ разрядом и криогенным охлаждением электродов действуют без принудительной замены газовой смеси как на основных, так и на обертоновых колебательно-вращательных переходах молекулы СО.

2. Найдены экспериментальные условия, позволяющие существенно замедлить деградацию лазерной смеси, и увеличить ресурс работы криогенных импульсно-периодических щелевых СО лазеров, действующих без замены активной среды до 10^6 импульсов.

3. Реализован импульсно-периодический режим генерации обертонового щелевого СО лазера без принудительной прокачки активной среды в спектральном диапазоне 2.5-3.9 мкм с высокими удельными характеристиками.

Практическая ценность работы

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что созданные компактные криогенные щелевые СО лазеры с ВЧ возбуждением активной среды могут найти применение для качественного и количественного спектроскопического анализа многокомпонентных газовых смесей, содержащих добавки вредных, токсичных, взрывчатых или наркотических веществ. Резонансное воздействие излучения СО лазера на различные органические и неорганические вещества открывает широкие возможности для его применения в лазерной химии и медицине. Использование излучения такого лазера в “окне прозрачности” атмосферы ($\lambda \sim 3.3\text{-}4.1\text{ мкм}$), может найти применение при транспортировке лазерного излучения

на большие расстояния, дистанционном лазерном зондировании, для функционального подавления приемных устройств и создания систем радарного типа различного назначения (например, измерителей скорости объектов и ветра). Излучение коротких импульсов СО лазера, полученных в режиме модуляции добротности, может использоваться для генерации суммарных и разностных частот в нелинейных кристаллах, что значительно расширит диапазон возможных применений такой системы. Полученные в ходе исследований экспериментальные результаты могут быть использованы для уточнения кинетической и плазмохимической моделей криогенных СО лазеров.

Защищаемые положения

1. Компактные щелевые СО лазеры с накачкой емкостным высокочастотным разрядом и криогенным охлаждением электродов действуют без прокачки активной среды как на переходах обертоновой полосы молекулы СО в спектральном диапазоне 2.5-3.9 мкм, так и на основных колебательно-вращательных переходах (5 - 6.5 мкм) в режимах импульсно-периодической, квазинепрерывной и непрерывной генерации, модуляции добротности резонатора и спектральной селекции.

2. В импульсно-периодическом режиме возбуждения криогенных СО лазеров без прокачки активной среды обеспечивается генерация $\sim 10^5$ - 10^6 лазерных импульсов только при использовании газовых смесей с аномально высоким содержанием кислорода (от 20 % до 50 % по отношению к концентрации молекул СО).

3. Удельная средняя мощность генерации с единицы площади поверхности электродов импульсно-периодического щелевого обертонового СО лазера без прокачки активной среды с накачкой емкостным высокочастотным разрядом и криогенным охлаждением электродов достигает 30 мВт/см² при эффективности 1.6%.

Апробация работы

Основные результаты диссертации были опубликованы в 5 статьях в журналах, индексируемых в базе данных Web of Science и в трех статьях в других изданиях, представлены на 7 всероссийских и 13 международных конференциях, а также на научных семинарах Отделения квантовой радиофизики ФИАН. Списки публикаций по теме диссертации и материалов конференций приведены в конце автореферата. Циклы работ по теме диссертации отмечались наградами на конкурсах научных работ: Премия фонда "Успехи физики" по результатам Открытого конкурса инновационных работ молодых учёных (2008 г.), Премия Физического института им. П.Н. Лебедева РАН в составе научного коллектива: Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В. (2009 г.). Часть полученных в работе результатов, относящихся к конструкции лазерной камеры с ВЧ накачкой и криогенным

охлаждением электродов, а также к работе этой установки с использованием активных сред с высоким содержанием кислорода, защищена патентом РФ №2354019 от 27.04.2009 “Активная среда для электроразрядного СО лазера или усилителя и способ ее накачки”, полученным в составе авторского коллектива Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В. Результаты представленных в диссертации исследований были использованы при создании щелевой ВЧ СО лазерной системы с криогенным охлаждением электродов по заказу “НИИ оптико-электронного приборостроения” в рамках Гособоронзаказа.

Достоверность результатов

Достоверность результатов, представленных в диссертации, подтверждается применением апробированных методов измерений с использованием современной измерительной аппаратуры, воспроизводимостью результатов на нескольких экспериментальных установках, полученным патентом, докладами на международных конференциях и публикациями в ведущих мировых научных журналах.

Личный вклад соискателя

Все излагаемые в данной работе экспериментальные и расчетные результаты получены лично автором или при его непосредственном участии совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. А.А. Иониным и научным консультантом к.ф.-м.н. Д.В. Сеницыным. Разработка и создание лазерных установок проводилась соискателем совместно с коллективом сотрудников лаборатории Газовых лазеров Отделения Квантовой Радиофизики (ОКРФ) Физического Института им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук (ФИАН, г. Москва).

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 107 страницах, включая 77 рисунков, список литературы насчитывает 158 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследований, изложены цель работы и задачи, необходимые для ее решения, научная новизна, научная и практическая ценность работы, отмечены достоверность результатов и личный вклад соискателя. Также во **Введении** представлены выносимые на защиту положения, сведения об апробации работы и публикациях, а также описана структура диссертации.

В **Главе 1 «Обзор литературы»** описаны основные принципы формирования инверсной населенности в активной среде СО лазера и представлен обзор

экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованиям СО лазеров с накачкой емкостным высокочастотным разрядом.

В разделе 1.1 представлены общие сведения о формировании инверсной населенности в активной среде электроразрядных СО лазеров и способ расчета коэффициента усиления слабого сигнала в активной среде с однородным уширением спектральных линий.

В разделе 1.2 представлен литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований, посвященных созданию и исследованию газовых лазеров с накачкой высокочастотным разрядом.

В **Главе 2 «Экспериментальные установки»** представлены описания, конструктивные особенности и основные параметры использованных в исследованиях установок, оптических схем и вспомогательного оборудования.

Все экспериментальные исследования, результаты которых приведены в диссертации, выполнены на двух щелевых СО лазерных установках с накачкой ВЧ разрядом и криогенным охлаждением электродов, созданных в лаборатории Газовых лазеров ОКРФ ФИАН. Конструктивно (**Рис. 1**) обе установки устроены одинаково и принципиально отличаются только длиной активной среды (250 и 400 мм).

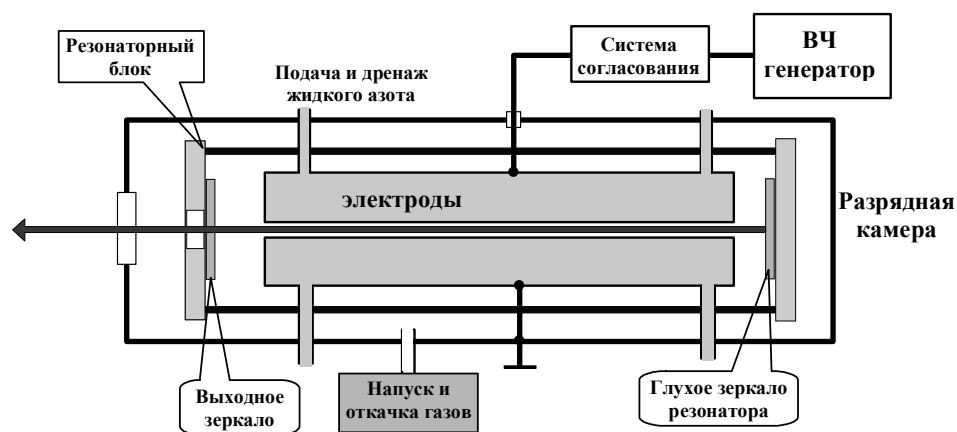


Рис.1. Схема щелевой СО лазерной установки с ВЧ возбуждением.

Основой конструкции установок (см. **Рис.1**) являются разрядные камеры прямоугольного и круглого сечений из нержавеющей стали, внутри которых находятся электродные системы и лазерный резонатор. Накачка разрядного промежутка осуществлялась ВЧ генераторами через систему согласования выходного сопротивления генератора с нагрузкой. Кроме того, использовались вспомогательные системы, предназначенные для вакуумной откачки и напуска газов, для подачи жидкого азота к электродной системе, для измерения энергетических, временных и спектральных характеристик лазерного излучения.

В разделе 2.1 описаны характеристики высокочастотных источников питания, которые использовались для накачки щелевых СО лазеров с криогенным охлаждением

электродов. Для возбуждения разряда использовались два высокочастотных генератора: RFPS-500AM с несущей частотой $F_0 = 81.36$ МГц и максимальной выходной мощностью $P_{ВЧ} = 620$ Вт и Dressler CESAR-6010 с несущей частотой $F_0 = 60$ МГц и максимальной выходной мощностью $P_{ВЧ} = 1$ кВт. Генераторы могли работать как в непрерывном режиме, так и в импульсно-периодическом режиме с низкочастотной амплитудной модуляцией выходной ВЧ мощности ($F_{\text{мод}} = 0.01\text{--}25$ кГц). При этом средняя ВЧ мощность $\langle P_{ВЧ} \rangle$, подводимая к разрядному промежутку, могла варьироваться скважностью $\tau/T_{\text{мод}} = 0.1\div 1.0$ и мгновенной амплитудой ВЧ мощности $P_{ВЧ}$ в каждом импульсе ($T_{\text{мод}} = 1/F_{\text{мод}}$ - период модуляции, τ - длительность модулирующего импульса).

В разделе 2.2 описана система согласования, обеспечивающая эффективную передачу ВЧ мощности от источников питания к области разряда.

В разделе 2.3 приводятся характеристики созданных разрядных камер щелевых СО лазерных установок с накачкой ВЧ разрядом и криогенным охлаждением электродов. Первая разрядная камера, изготовленная из нержавеющей стали, рассчитана на использование электродной системы длиной 250 мм, имеет внутренний объем ~ 8 л. На боковых стенках разрядной камеры имеются отверстия с фланцами для подсоединения системы вакуумной откачки, системы напуска газовой смеси, патрубков подачи жидкого азота к электродной системе и его дренажа. На торцевых стенках камеры расположены оптические окна для вывода лазерного излучения и юстировочные устройства, обеспечивающие настройку зеркал резонатора. На верхней крышке камеры расположены токовводы и предусмотрена установка двух иллюминаторов для визуального наблюдения за ВЧ разрядом.

Вторая разрядная камера представляет собой цилиндрическую конструкцию, боковая поверхность которой изготовлена из нержавеющей стали, а торцевые стенки – из капролона (полиамид-6). Камера имеет внутренний объем ~ 15 л и рассчитана на использование электродной системы длиной 400 мм. На одной из торцевых стенок расположены отверстия с фланцами для подсоединения системы вакуумной откачки, системы напуска газовой смеси, патрубков подачи и дренажа жидкого азота к электродной системе, а также токовводы для подачи ВЧ напряжения на электроды. На второй торцевой стенке расположено оптическое окно из CaF_2 для вывода лазерного излучения и юстировочные устройства, обеспечивающие настройку зеркал резонатора.

В разделе 2.4 приводятся описание различных конфигураций электродных систем, использовавшихся в экспериментах, и результаты измерений температуры активной среды при криогенном охлаждении электродов, скоростей охлаждения различных электродных систем и их нагрева при включении ВЧ разряда.

Электродные системы обеих установок сконструированы по одинаковому принципу и состоят из двух пустотелых латунных электродов, зафиксированных на массивном металлическом основании при помощи диэлектрических держателей с регулировочными винтами и расположенных параллельно друг другу. Расстояние между электродами в экспериментах варьировалось от 1 до 5 мм. К каждому электроду подводятся две сильфонные трубки (для ввода и дренажа хладагента), через которые непрерывно прокачивается жидкий азот. В экспериментах с первой разрядной камерой использовались две электродные системы с высотой разрядного промежутка 16 мм и 30 мм. Высота электродов второй разрядной камеры составляет 16 мм. В обеих установках разрядные промежутки ориентированы вертикально, что позволяет свободно выводить сжиженные продукты плазмохимических реакции из разрядного промежутка в буферный объем, находящийся при комнатной температуре. Рабочие поверхности электродов отполированы до зеркального блеска.

Типичное время охлаждения установок при подготовке к работе составило 15 – 20 минут для всех электродных систем при этом температура газовой смеси в разрядном промежутке была 100 ± 10 К.

В разделе 2.5 приводится конструкция модуля лазерного резонатора. В различных экспериментальных сериях по исследованию генерационных лазерных характеристик использовались резонаторы различной конфигурации, общим параметром которых была длина, составлявшая 270 мм в первой лазерной камере и 420 мм во второй.

В разделе 2.6 приводится описание дополнительных систем обеспечения работы лазеров, таких как система охлаждения электродов, откачки лазерной камеры и напуска газовых смесей, а также оборудования, использовавшегося для измерения различных характеристик лазерных установок.

В **Главе 3 «Генерация излучения на переходах основной полосы молекулы СО»** приведены результаты параметрического исследования характеристик криогенных щелевых СО лазеров с накачкой емкостным ВЧ разрядом, работающих в различных режимах на колебательно-вращательных переходах основной полосы молекулы СО. В этих экспериментах варьировались условия накачки (мощность и длительность импульсов накачки, частота модуляции) и свойства активной среды лазера (состав смеси, ее давление). Основная часть экспериментов проводилась на установке с длиной активной среды 250 мм при ширине межэлектродного зазора 3 мм. Лазерный устойчивый резонатор в этих экспериментах состоял из «глухого» (кварц с напылением из Al) сферического ($R=1500$ мм) зеркала и плоского выходного зеркала (пластина из CaF_2 с диэлектрическим покрытием) с коэффициентом отражения $(85 \pm 5)\%$ в диапазоне длин волн 4.9-7.1 мкм.

В разделе 3.1 представлены результаты экспериментального исследования влияния состава и давления активной среды на энергетические характеристики лазера с длиной активной среды 250 мм. Обычно основными компонентами активной среды СО лазеров (кроме окиси углерода) являются гелий, обеспечивающий эффективный теплообмен с охлаждаемыми поверхностями, и азот, позволяющий запасать энергию накачки и передавать ее молекулам СО в результате межмолекулярного VV обмена. В некоторых случаях также используются малые добавки кислорода (3-5% от концентрации СО) для компенсации потери активных частиц в результате диссоциации молекул СО в разряде, а также ксенона для снижения электронной температуры плазмы разряда и снижения скорости диссоциации молекул СО. В наших экспериментах применение таких стандартных смесей при криогенной температуре приводило к быстрому снижению мощности лазерного излучения из-за деградации активной среды и интенсивному образованию углеродной пленки на рабочих поверхностях охлаждаемых электродов. Добавление же Хе в активную среду в нашем случае оказалось неэффективно в связи с низким давлением его насыщенных паров при криогенных температурах (~ 0.1 Торр при $T = 100$ К). Длительную эффективную работу СО лазеров с криогенным охлаждением электродов и без принудительной замены активной среды удалось реализовать только при использовании газовых смесей с аномально высоким содержанием кислорода (20 – 60% от концентрации СО), позволяющих компенсировать потерю активных частиц в результате диссоциации молекул СО.

В результате экспериментов было показано, что оптимальное давление газовой смеси зависит от конфигурации электродной системы и составляет ~ 37 Торр (что соответствует плотности частиц в разрядном промежутке $N \sim 0.15$ Амага¹) для электродной системы с межэлектродным зазором $250 \times 16 \times 3$ мм³ и ~ 25 Торр для электродной системы с межэлектродным зазором $250 \times 30 \times 3$ мм³. При этом наилучшие энергетические характеристики достигаются при использовании газовых смесей с содержанием Не $\sim 70 \div 95\%$ в смеси и концентрацией азота не превышающей концентрацию окиси углерода. Концентрация кислорода оказывает влияние как на мощность лазерного излучения, так и на длительность работы лазера без замены активной среды. Наибольшая мощность генерации лазерного излучения достигалась при использовании активной среды с меньшим содержанием кислорода (до 30% по отношению к концентрации молекул СО), а наилучшая долговременная стабильность – в смесях с наибольшим содержанием кислорода ($\sim 60\%$).

¹ Амага – единица плотности газа, численно равная количеству молей газа в молярном объеме (22.414 л). При плотности газа N [Амага] концентрация частиц равна $N \times 2.687 \cdot 10^{25}$ м⁻³.

В разделе 3.2 представлены результаты экспериментов по определению оптимальной частоты модуляции ВЧ мощности накачки. При постоянной величине средней мощности ВЧ возбуждения $\langle P_{ВЧ} \rangle = 62$ Вт (длительность модулирующих импульсов составляла 10% от периода модуляции и изменялась обратно-пропорционально $F_{\text{мод}}$), увеличение частоты модуляции $F_{\text{мод}}$ от 100 Гц до 500 Гц приводило к росту средней мощности лазерного излучения, а дальнейшее увеличение частоты до 2.5 кГц – к постепенному уменьшению средней мощности излучения и эффективности лазерной генерации.

В разделе 3.3 представлены результаты экспериментов по определению влияния мощности ВЧ возбуждения на энергетические характеристики лазера в разрядной камере с длиной активной среды 250 мм и высотой разрядного промежутка 16 мм. При увеличении средней мощности ВЧ возбуждения от ~40 Вт до ~150 Вт путем вариации длительности импульса накачки τ в диапазоне $\tau = (0.1 - 0.7) \cdot T_{\text{мод}}$ при амплитуде ВЧ мощности $P_{ВЧ} = 400$ Вт, средняя выходная мощность СО лазера возрастала и достигала своего максимального значения ~12 Вт. При этом эффективность щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением оставалась примерно на одном уровне и составляла ~8 - 9 %. Дальнейшее увеличение $\langle P_{ВЧ} \rangle$ до 280 Вт приводило к резкому падению и выходной мощности СО лазера и его КПД. По-видимому, в данных условиях жидкий азот вскипает внутри электродов, в результате чего между внутренней поверхностью электрода и жидким азотом появляется слой пара с низкой теплопроводностью, который препятствует отводу тепла из ВЧ разряда.

В разделе 3.4 проводится сравнение энергетических характеристик криогенного СО лазера с ВЧ накачкой и длиной активной среды 250 мм при различной высоте разрядного промежутка. Увеличение с 16 до 30 мм высоты разрядного промежутка примерно вдвое уменьшило среднюю плотность вкладываемой в активную среду ВЧ мощности, и привело к изменению условий охлаждения и конвекции газа. За счет этого увеличилась максимальная эффективность генерации лазерного излучения, которая достигала величины 14%. По этой причине все дальнейшие эксперименты с лазерной камерой с длиной активной среды 250 мм были выполнены с электродной системой с высотой разрядного промежутка 30 мм.

В разделе 3.5 представлены результаты измерений спектральных и временных характеристик излучения лазера. В зависимости от режима ВЧ возбуждения (частота модуляции, скважность и абсолютная длительность импульсов) ВЧ СО лазер может работать в непрерывном, импульсно-периодическом (короткие импульсы с большой скважностью) и в квазинепрерывном режимах (накачка последующего импульса начинается до окончания генерации излучения предыдущего). Однако при

длительностях импульса накачки ~ 400 мкс и выше интенсивность генерации начинала спадать еще до окончания импульса накачки вследствие перегрева смеси. Длительность импульсов лазерного излучения варьируется от нескольких сотен микросекунд до нескольких миллисекунд (в зависимости от экспериментальных условий).

Спектр излучения щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением, действующего в режиме свободной генерации, состоял из ~ 10 линий в диапазоне длин волн от 5.08 до 5.37 мкм, а спектральный состав зависел от условий экспериментов.

В разделе 3.6 представлены результаты измерений долговременной стабильности средней мощности лазерной генерации. Поскольку в каждой серии экспериментов лазер работал без принудительной замены смеси в области разряда, т.е. аналогично отпаянным лазерным системам, была проведена серия измерений средней выходной мощности щелевого СО лазера на большом временном промежутке. При этом режим работы ВЧ генератора оставался неизменным в течение всего времени эксперимента. При частоте повторения импульсов накачки $F_{\text{мод}} = 100$ Гц флуктуации средней выходной мощности лазерного излучения не превышали $\sim 10\%$ в течение более чем одного часа. При этом общее количество лазерных импульсов достигало величины $\sim 5 \cdot 10^5$.

В разделе 3.7 представлены результаты экспериментов по генерации излучения щелевого СО лазера с ВЧ накачкой и криогенным охлаждением электродов в частотно-

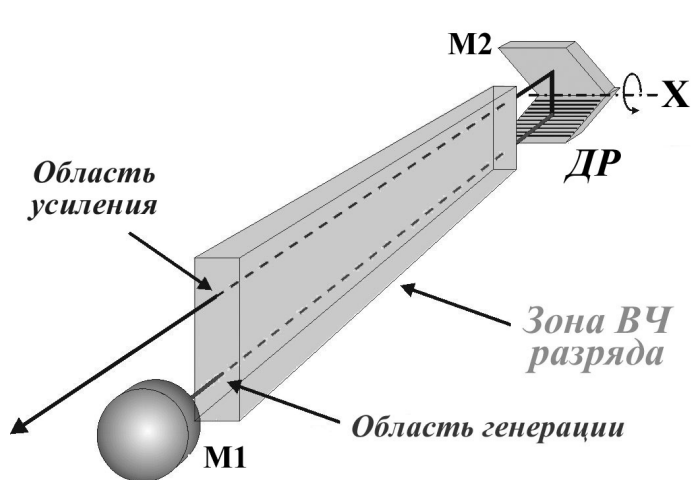


Рис. 2. Схема резонатора частотно селективного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

(210 штр/мм) с выводом излучения в нулевой порядок. Зеркало M2 и ДР были скомпонованы в единый блок (угол между ними равен 90°). При вращении блока ДР+M2 вокруг оси X в процессе частотной перестройки лазерного резонатора, излучение, выведенное в нулевой порядок ДР, проходило по области усиления строго параллельно оси резонатора. Такая конфигурация лазерного резонатора позволяла не

селективном режиме. Эти эксперименты проводились при использовании лазерного резонатора, схема которого приведена на Рис.2. Активная среда была условно поделена на две части - область генерации и область усиления. Область генерации была помещена в лазерный резонатор, состоящий из "глухого" вогнутого ($R = 1$ м) зеркала M1 и дифракционной решетки ДР

только избежать потери излучения, выходящего из резонатора в нулевой порядок дифракции, но и реализовать в щелевой геометрии разрядного промежутка оптическую схему задающий генератор – лазерный усилитель.

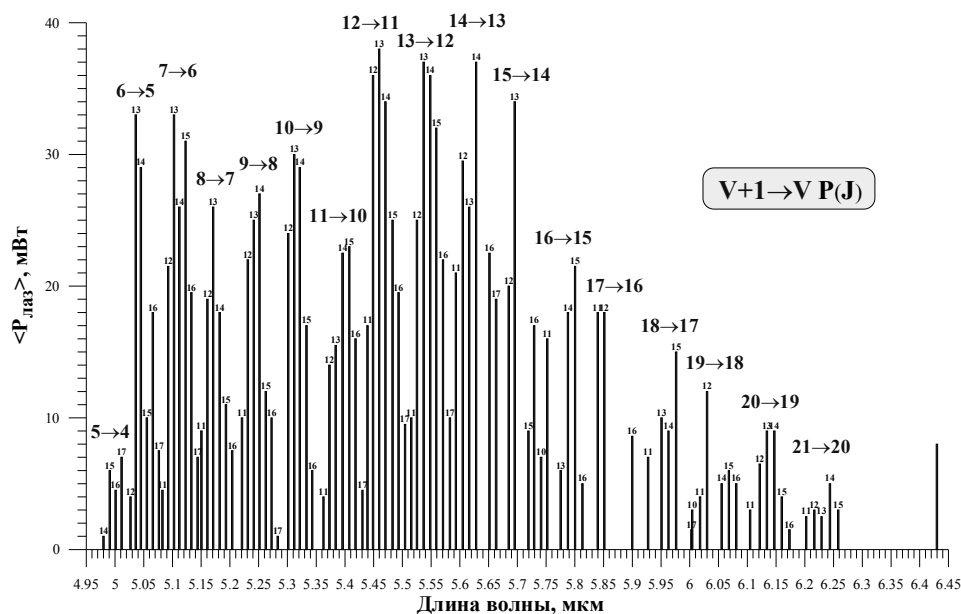


Рис. 3.
Перестроечная
спектрально-
энергетическая
характеристика
частотно-
селективного
щелевого СО лазера с
ВЧ возбуждением.

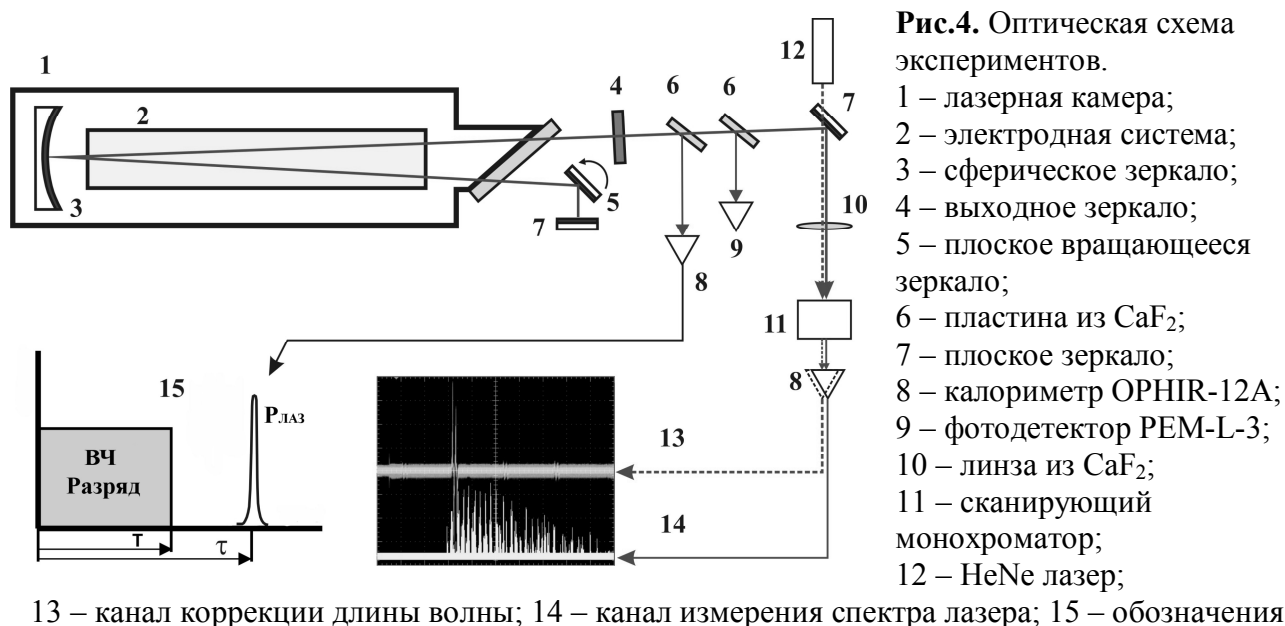
При фиксированных экспериментальных условиях (газовая смесь СО:Воздух:Не=1:1:10, давление 22 Торр, $F_{\text{мод}} = 500$ Гц, $\tau = 0.05 \cdot T_{\text{мод}}$) одночастотный режим генерации лазера был реализован на ~ 100 лазерных линиях в диапазоне длин волн от 4.98 мкм до 6.26 мкм со средней выходной мощностью от нескольких единиц до нескольких десятков милливатт в линии (**Рис. 3**). При увеличении мощности возбуждения за счет увеличения длительности импульса накачки (до $\tau = 0.07 \cdot T_{\text{мод}}$) спектральный диапазон лазера расширился в длинноволновую область (крайняя правая линия на **Рис. 3** в районе 6.43 мкм соответствует границе спектра в этих условиях).

В разделе 3.8 представлены результаты исследования характеристик излучения щелевого СО лазера с ВЧ накачкой и криогенным охлаждением электродов, действующего в режиме модуляции добротности резонатора.

Для решения некоторых задач, например, преобразования частоты излучения в нелинейных кристаллах или дистанционного зондирования, необходимы источники излучения с короткими импульсами и высокой пиковой мощностью. Такие режимы генерации были реализованы на установке с длиной активной среды 400 мм в режиме модуляции добротности резонатора. Оптическая схема этих экспериментов представлена на **Рис.4**. Использовался V-образный устойчивый резонатор длиной 1.7 м с двойным проходом через активную среду (2), который обеспечивался находящимся внутри лазерной камеры сферическим зеркалом (3) с радиусом кривизны 1.8 м (Au на стекле). Излучение из лазерной камеры выводилось через окно из CaF_2 , расположенное под углом Брюстера к оси резонатора. В качестве выходного зеркала использовалась плоскопараллельная пластиной из полированного кремния. Отражение от плоского

глухого зеркала резонатора (Au на стекле) (7) происходило через промежуточное вращающееся зеркало (Al на стекле) (5). Включение ВЧ генератора обеспечивалось управляющим сигналом с генератора импульсов Г5-63, позволяющим регулировать в широком диапазоне значений длительность и задержку начала импульсов накачки от получения сигнала синхронизации. Сигнал синхронизации заводился с оптического датчика, излучение на который попадало от вспомогательного полупроводникового лазера после отражения от вращающегося зеркала за $\sim 1/8$ часть оборота до положения, при котором резонатор оказывался съюстирован.

Были проведены измерения пиковой мощности и спектра лазерного излучения в зависимости от длительности задержки начала генерации излучения относительно начала импульса накачки. При этом длительность импульса ВЧ накачки была фиксирована и составляла 330 мкс при мощности ВЧ генератора $P_{ВЧ}=880$ Вт. Частота следования импульсов варьировалась от 80 до 130 Гц, а задержка от 50 до 1500 мкс. Измерения проводились для трех значений давления (22.5, 37 и 45 Торр) лазерной смеси $CO:O_2:He=1:0.3:10$. Максимум мощности излучения достигался при частоте повторения импульсов 130 Гц и задержках $\sim 50 \div 200$ мкс после окончания накачки, при этом оптимальная задержка была тем меньше, чем выше давление активной среды. Минимальная длительность импульсов генерации изменялась в пределах $0.65 \div 0.85$ мкс (по полувысоте) в зависимости от длительности задержки после начала накачки.



Спектр лазерного излучения при $\tau=400$ мкс, представленный на **Рис.5**, охватывал диапазон длин волн 4.95-6.75 мкм и состоял из ~ 80 колебательно-вращательных компонент. Суммарная по всем линиям пиковая мощность излучения достигала 3 кВт. В зависимости от величины задержки от начала импульса накачки спектр лазерного излучения также изменялся. Во время импульса накачки основная часть колебательной

энергии сосредоточена на нижних колебательных уровнях, а спектр излучения охватывал интервал длин волн 5-6 мкм. После окончания импульса накачки, колебательное возбуждение распространяется на верхние колебательные уровни за счет VV обмена, а спектр лазерного излучения расширяется до длины волны ~ 7 мкм.

Также была измерена временная динамика излучения на отдельных вращательных компонентах различных колебательных полос из многочастотного спектра излучения СО лазера. Генерация большинства наиболее сильных лазерных линий перекрывалась по времени. Однако на некоторых линиях, как правило, компонентах колебательных полос с вращательными квантовыми числами $J=5\div 6$ и $J=13\div 14$, имеющих относительно низкую интенсивность, излучение происходило в разные моменты времени.

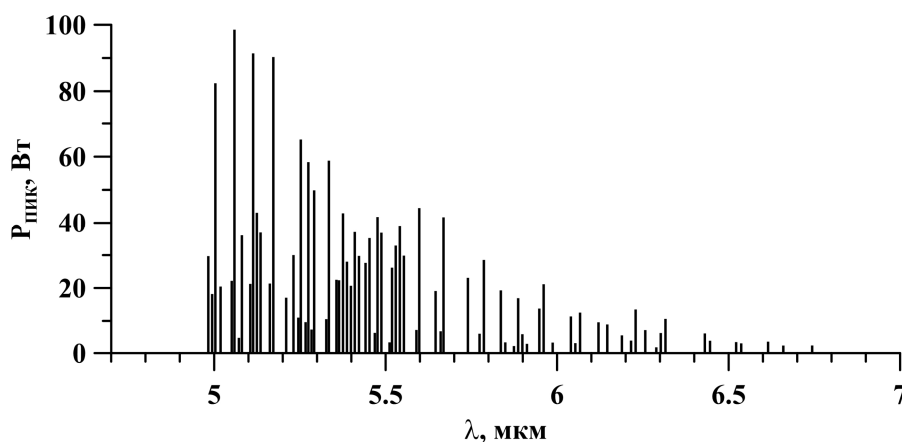


Рис.5. Спектральное распределение мощности излучения криогенного щелевого СО лазера с ВЧ накачкой в режиме модуляции добротности при $\tau=400$ мкс.

В разделе 3.9 приводятся выводы по Главе 3.

В Главе 4 «Генерация излучения на переходах первого колебательного обертона молекулы СО» приведены результаты исследований генерационных характеристик обертонового щелевого СО лазера с накачкой емкостным ВЧ разрядом и криогенных плазмохимических процессов в его активной среде, определяющих возможности лазера стабильно работать максимально долго в квази отпаянном режиме (без принудительной замены активной газовой смеси).

В разделе 4.1 представлены результаты экспериментального исследования характеристик излучения обертонового СО лазера в разрядной камерой с длиной активной среды 250 мм.

В этих экспериментах использовались устойчивые лазерные резонаторы, образованные интерференционными зеркалами с высоким отражением в области обертоновых переходов молекулы СО, и малым отражением в спектральной области с длиной волны выше 5 мкм, для подавления генерации на основных переходах молекулы СО. В качестве глухого зеркала использовалось сферическое зеркало М0 с радиусом кривизны 2 м и максимальным отражением (более 99.9%) в диапазоне длин волн от 2.5 до 3.9 мкм. В качестве выходных зеркал использовались плоские зеркала

М1 и М2 с отражением 99.0 – 99.5 % в диапазонах длин волн 2.5 – 3.1 мкм и 3.1 – 4.0 мкм соответственно. Расходимость лазерного излучения θ в горизонтальном направлении (вдоль направления наименьшего размера щели) составляла $\theta \approx 2 \cdot 10^{-3}$ рад.

На **Рис. 6** представлены типичные измеренные распределения мощности генерации по спектральным линиям лазера с импульсно-периодическим ВЧ возбуждением в режиме неселективной свободной генерации при использовании зеркал резонатора М0+М1 и М0+М2. Выходной спектр лазерного излучения при различных режимах накачки соответствовал спектральной области с максимальным коэффициентом отражения выходных зеркал резонатора. В обоих диапазонах спектр состоял из ~50 лазерных линий. При использовании набора зеркал резонатора М0+М1 спектр располагался в диапазоне длин волн $2.5 \div 3.1$ мкм (переходы колебательных полос от 8→6 до 22→20), а при использовании набора М0+М2 – в спектральном диапазоне $3.05 \div 3.9$ мкм (переходы колебательных полос от 21→19 до 36→34). Форма импульса генерации и время задержки начала генерации относительно начала накачки для различных колебательно-вращательных переходов в спектре многочастотного излучения были различными и зависели, в пределах одной колебательной полосы, от номера вращательного квантового числа J . Это различие связано с процессом термодиффузии активной среды, которая охлаждается в промежутках между импульсами накачки. В результате изменяется Больцмановское распределение населенностей молекулы СО по вращательным подуровням, что приводит к смещению оптимальных условий для генерации излучения от лазерных переходов с большим номером вращательного квантового числа J сразу после импульса накачки к переходам с меньшим номером J в процессе охлаждения смеси.

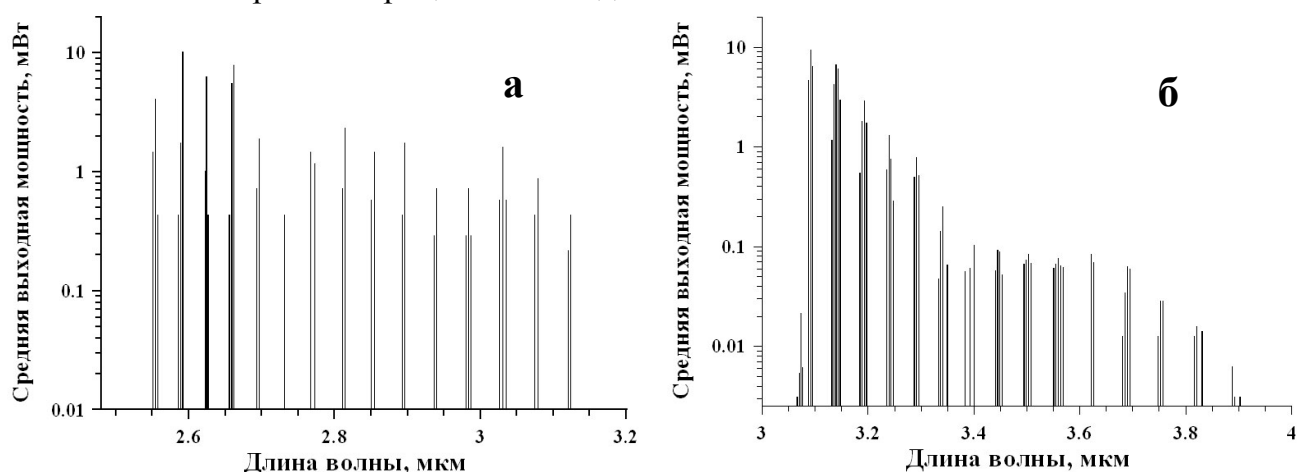


Рис. 6. Спектр свободной многочастотной генерации обертоного щелевого СО лазера с лазерным резонатором, образованном зеркалами М0+М1(а) и М0+М2 (б).

Максимальная средняя мощность СО лазера в диапазоне длин волн 2.5 – 3.1 мкм достигала ~0.4 Вт, а в диапазоне длин волн 3.1 – 3.9 мкм ~130 мВт суммарно по всем линиям генерации. Максимальная эффективность лазера достигала ~1.6% при использовании импульсно-периодической накачки с частотами повторения импульсов от 300 до 500 Гц и длительностью импульсов накачки 0.2 - 0.5 мс. Оптимальный состав и давление активной среды соответствовали условиям, полученным при параметрическом исследовании генерации излучения в этом же лазере на основных переходах молекулы СО: смесь $\text{CO}:\text{O}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:(0.2\div0.6):(0\div1):(5\div20)$, давление 20÷25 Торр при использовании электродной системы с высотой разрядного промежутка 30 мм.

В разделе 4.2 представлены результаты экспериментального исследования характеристик излучения обертонового СО лазера, реализованного на основе разрядной камеры с длиной активной среды 400 мм.

В первых экспериментах использовались лазерные резонаторы длиной 420 мм, образованные парами зеркал $\text{M0} + \text{M1}$ и $\text{M0} + \text{M2}$. В качестве лазерной смеси использовалась газовая смесь $\text{CO}:\text{O}_2:\text{He}=1:0.25:10$ при давлении 22 Торр. Распределение мощности излучения по лазерным линиям определялось спектральными характеристиками выходного зеркала резонатора и соответствовало распределению, полученному на первой экспериментальной установке с тем же набором зеркал резонатора.

В ходе параметрического исследования этого лазера была получена лазерная генерация на обертоновых переходах молекулы СО при частотах повторения импульсов накачки от 10 Гц до 7.5 кГц. Было установлено, что наилучшие энергетические характеристики лазера достигаются при частоте следования импульсов накачки ~400÷500 Гц с длительностью $\tau \sim 0.25\div0.3$ Тмод и межэлектродным зазором ~3.5 мм, газовая смесь $\text{CO}:\text{O}_2:\text{He} = 1:0.33:10$ при давлении 22 Торр. При оптимальных параметрах ВЧ накачки, средняя мощность лазерного излучения в спектральных диапазонах 2.5 ÷ 3.1 мкм и 3.05 ÷ 3.9 мкм достигала 1 Вт, при эффективности 1.6%, что значительно превышает мощность излучения, полученного на установке с длиной электродов 250 мм.

Кроме того, была получена генерация излучения с использованием менее плотных выходных зеркал лазерного резонатора. При использовании выходного зеркала M3 (отражение 92÷94% в диапазоне длин волн 3.1÷4 мкм), мощность лазерного излучения достигала 250 мВт. Получение генерации при использовании резонатора с такими потерями свидетельствует о потенциальной возможности реализации частотно-селективного режима работы этого лазера.

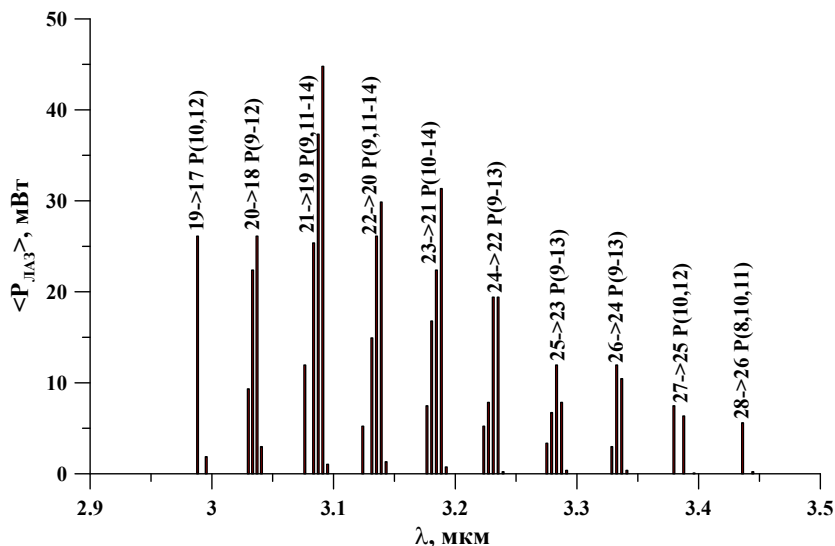


Рис. 7. Типичное спектральное распределение излучения лазера с зеркалами резонатора M0+M4.

Наилучшие результаты были получены при использовании выходного зеркала M4 с коэффициентом пропускания от 1-3 % в спектральном диапазоне 3.0÷3.5 мкм. Средняя мощность излучения лазера с этим резонатором достигала 1.95 Вт, что соответствует величине удельной средней мощности генерации с единицы площади поверхности электродов 30 мВт/см^2 , а эффективность $\sim 1.6 \%$. При этом удельная средняя мощность излучения с единицы объема активной среды составляла $\sim 100 \text{ Вт/л}$, что превышает полученную ранее удельную мощность оберточных СО лазеров с накачкой продольным разрядом постоянного тока [2, 13]. Спектр излучения лазера располагался в диапазоне длин волн от 2.98 до 3.45 мкм (**Рис. 7**).

В разделе 4.3 представлены результаты экспериментов по исследованию спектрально-временных особенностей генерации многочастотного оберточного излучения.

В импульсно-периодическом режиме работы (частоты повторения импульсов до $\sim 1 \text{ кГц}$, см. **Рис.8а**) длительность отдельных импульсов генерации оберточного излучения составляла несколько миллисекунд и увеличивалась с увеличением энерговклада, а также при снижении давления газовой смеси. При этом генерация излучения начиналась с задержкой относительно начала импульса накачки, а в тех случаях, когда следующий импульс накачки начинался до завершения предыдущего импульса лазерной генерации, наблюдался срыв генерации предыдущего импульса. Поэтому оптимальная частота повторения импульсов накачки, при которой была получена максимальная средняя мощность лазерного излучения, составляла 400 – 500 Гц и соответствовала условиям, когда новый импульс накачки начинался сразу после окончания предыдущего импульса генерации. При увеличении энерговклада как за счет длительности, так и за счет амплитуды импульсов ВЧ накачки лазерная генерация успевала не только возникнуть во время накачки, но также достигнуть

значительной величины и начать затухать в результате перегрева активной среды (см. **Рис.8а** кривая 2).

Увеличение частоты модуляции ВЧ разряда от 1 до 7.5 кГц приводило к снижению средней мощности лазерного излучения, однако в этом случае наблюдался квазинепрерывный режим лазерной генерации (см. **Рис.8б**), при котором генерация излучения между импульсами накачки не пропадала, а во время импульса накачки наблюдалось либо снижение мощности лазерной генерации при низкой мощности накачки (см. **Рис.8б** кривая 1), либо увеличение мощности излучения при больших мощностях накачки (см. **Рис.8б** кривая 2).

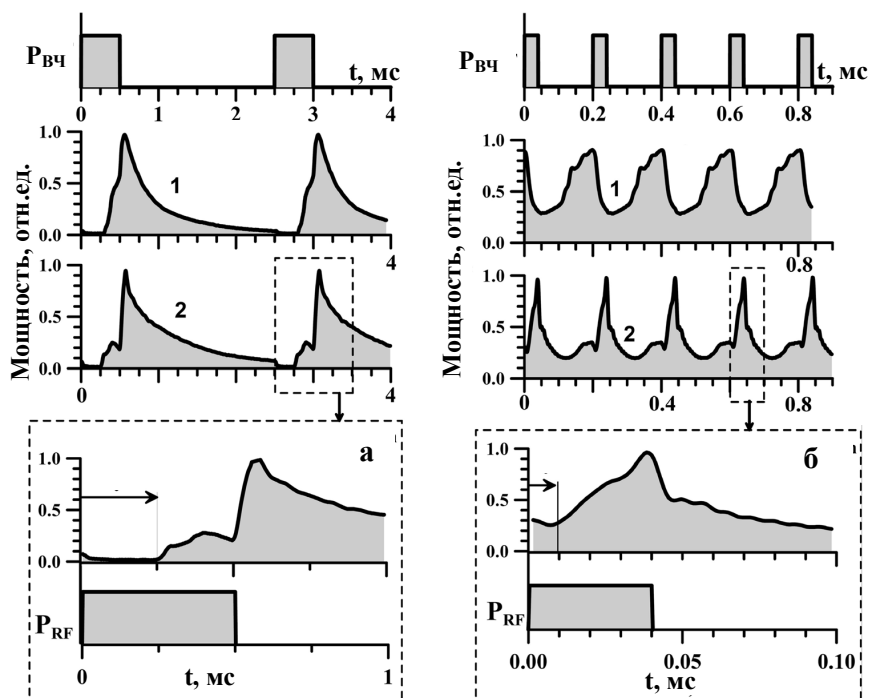


Рис. 8. Временная динамика импульсов излучения при различных частотах повторения и мощности импульсов ВЧ накачки. Газовая смесь $\text{CO}:\text{O}_2:\text{He} = 1:0.3:10$, 22 Торр, $\lambda = 2.5\text{--}3.1$ мкм, $\tau = 0.2 T_{\text{МОД}}$, $F_{\text{МОД}} = 400$ Гц (а) и 1000 Гц (б). Амплитуда мощности ВЧ накачки $P_{\text{ВЧ}} = 250$ Вт (1) и 600 Вт (2).

Аналогично результатам, полученным в лазерной камере с длиной активной среды 250 мм, различные колебательно-вращательные переходы в спектре многочастотного излучения отличались по форме импульса генерации и времени задержки начала генерации относительно начала импульса накачки. Причем в пределах одной колебательной полосы, они зависели, от номера вращательного квантового числа J. Полученные результаты позволили провести оценку температуры активной среды до и после импульса накачки, а также определить скорость охлаждения смеси в разрядном промежутке. Результаты оценки показали, что в условиях проведения экспериментов (активная среда $\text{CO}:\text{O}_2:\text{He} = 1:0.33:10$, 22 Торр, частота повторения импульсов накачки 300 Гц с длительностью 0.5 мс) активная среда нагревалась разрядом до температуры ~ 170 К. А между импульсами накачки, за время ~ 2.5 мс остывала до начальной температуры ~ 90 К. Полученное время восстановления температуры в активной среде соответствует периоду повторения импульсов накачки, при котором реализуется максимальная средняя мощность лазерного излучения.

В разделе 4.4 представлены результаты исследования влияния различных экспериментальных условий на долговременную динамику работы щелевого СО лазера с криогенным охлаждением электродов, действующего без принудительной замены активной среды. В ходе исследования было установлено, что основное влияние на время работы лазера оказывают частота повторения импульсов накачки и концентрация кислорода в активной среде.

При отсутствии кислорода (см. Рис.9) генерация излучения начинается сразу после включения накачки, после чего быстро затухает. При использовании кислородсодержащих смесей время работы лазера достигало ~1 часа при частоте модуляции мощности накачки 400 Гц. При этом общее количество лазерных импульсов превышало величину 10^6 . В зависимости от задачи, частота следования лазерных импульсов может быть изменена в широких пределах, а время стабильной непрерывной работы может быть увеличено многократно.

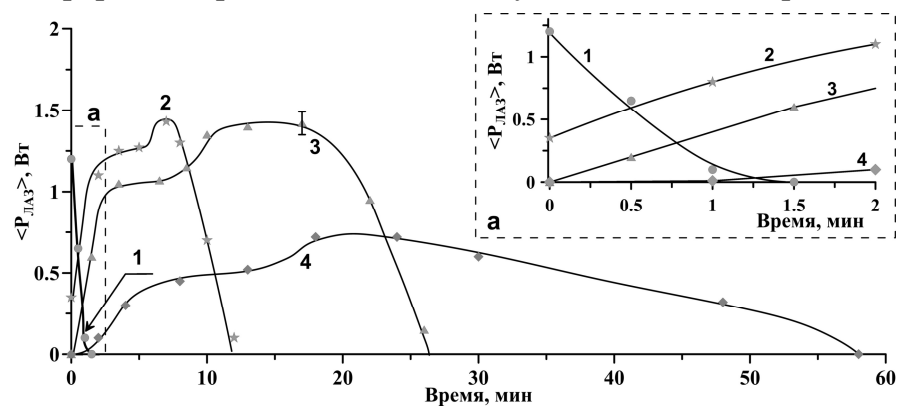


Рис.9. Временная динамика средней мощности излучения лазера при различной начальной концентрации кислорода в лазерной смеси. Врезка (а) – растяжка первых двух минут после начала работы. Лазерная смесь СО:О₂:Не=1:X:10, X=0 (1); 0.1 (2); 0.3 (3) и 0.5 (4).

Спектральный диапазон $\lambda=3.0-3.5$ мкм. $P_{ВЧ}=350$ Вт, $F_{МОД}=400$ Гц, $\tau=0.2T_{МОД}$, $P=22$ Торр.

В течение каждого цикла работы лазера динамика мощности лазерного излучения имела ряд характерных особенностей. При включении разряда наблюдался период “молчания” – временной интервал, в течение которого, генерация излучения не наблюдалась, затем постепенное нарастание мощности лазерного излучения и скачок мощности на 10-20% в середине цикла работы. В конце цикла работы для всех газовых смесей наблюдалось падение мощности излучения лазера. Все характерные временные интервалы увеличивались с увеличением концентрации кислорода, а наибольшая мощность излучения достигалась при использовании активных сред с меньшим содержанием О₂.

Было проведено сравнение динамики средней мощности лазерного излучения при накачке смеси ВЧ разрядом с одинаковой средней мощностью, но разной частотой повторения импульсов. При увеличении частоты до ~500 Гц время работы лазера существенно уменьшалось. Однако при дальнейшем увеличении частоты длительность работы уменьшалась незначительно. При частоте 5 кГц время работы установки уменьшилось менее чем на 10% по сравнению со временем работы на частоте 400 Гц.

Долговременная динамика мощности излучения лазера в различных диапазонах обертоновой полосы имела незначительные отличия, что противоречило результатам более ранних работ (см., например, [14, 15]), где было показано, что даже незначительные добавки кислорода (~10% от концентрации СО) в активную среду СО лазера заметно снижают коэффициент усиления слабого сигнала на переходах колебательных полос от 19→18 (что соответствует длине волны ~3 мкм) и выше, а при концентрациях кислорода более 30% от концентрации СО усиление на этих переходах вообще отсутствует.

Для объяснения причин появившихся противоречий, а также для определения причин возникновения периода “молчания” и постепенного роста средней мощности излучения лазеров были проведены дополнительные серии экспериментов, результаты которых представлены в разделе 4.5.

Во-первых, были измерены спектры поглощения газовых смесей, которые отбирались из буферного объема на разных этапах рабочего цикла. Эти измерения показали, что концентрация СО убывает равномерно на протяжении всего цикла работы лазера. При этом СО₂ в газовой фазе отсутствует до тех пор, пока продолжается охлаждение.

Во-вторых, были измерены спектры люминесценции активной среды в видимом и УФ диапазонах в течение всего рабочего цикла. А также проведены измерения поглощения излучения ртутной лампы, на длине волны, попадающей в полосу поглощения озона. Эти измерения показали, что динамика люминесценции СО качественно повторяет динамику мощности лазерного излучения. Углерод начинает активно образовываться только во второй половине цикла работы лазера. Люминесценция гелия наблюдается в конце цикла работы, когда в активной среде концентрация молекулярных компонент значительно снижается. Озон в камере нарабатывался в течение первых нескольких минут и оставался в буферном объеме на протяжении практически всего цикла работы лазера.

Сопоставление полученных результатов с динамикой мощности лазерного излучения позволило сформировать общее представление о плазмохимических процессах, происходящих в активной среде. На первом этапе происходит активное преобразование О₂ в О₃ и накопление его в жидкой фазе на холодных элементах. Этот процесс сопровождается увеличением мощности лазера по мере убывания количества молекул О₂. Затем начинается квазистационарный режим работы, при котором большая часть образовавшегося в процессе развала молекул СО углерода восстанавливается в реакциях с О₃ до молекул СО. При этом мощность генерации примерно соответствует мощности лазера в начальный момент работы на

бескислородной смеси. К середине рабочего цикла количество кислорода становится недостаточным для восстановления всего образовавшегося углерода. С изменением состава смеси меняются параметры разряда, а также увеличивается удельный энерговклад на молекулу СО, что приводит к росту мощности лазерного излучения в середине рабочего цикла.

В конце рабочего цикла концентрация СО становится недостаточной для поддержания коэффициента усиления на прежнем уровне, что и приводит к постепенному снижению мощности излучения лазера.

В разделе 4.6 приводятся выводы по Главе 4.

В **Заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты настоящего исследования:

1. Созданы компактные щелевые СО лазеры с криогенным охлаждением электродов и накачкой непрерывным и импульсно-периодическим ВЧ разрядом с частотой повторения импульсов от 10 Гц до 7.5 кГц. Определены оптимальные условия работы лазеров (состав и давление газовой смеси, параметры ВЧ накачки) в режиме свободной многочастотной генерации.

2. Определена роль кислорода в активной среде криогенного СО лазера, действующего без принудительной замены газовой смеси. Добавление кислорода в активную среду с концентрациями от 10 до 30 % от концентрации молекул СО, позволяет получить генерацию излучения с наибольшей мощностью, в то время как дальнейшее увеличение концентрации O_2 приводит к увеличению времени работы установки при снижении средней мощности лазерного излучения. При наибольших концентрациях кислорода (50 % от концентрации СО) обеспечивается генерация более чем 10^6 лазерных импульсов.

3. Получена генерация излучения на колебательно-вращательных переходах обертоновой полосы молекулы СО в спектральном диапазоне 2.5-4.0 мкм. В спектральном диапазоне от 2.95 до 3.45 мкм, средняя мощность излучения лазера достигала ~2 Вт с эффективностью 1.6 %. При этом удельная мощность излучения с единицы объема активной среды (100 Вт/л) превышала максимальное значение аналогичной характеристики, полученной в обертоновых СО лазерах с накачкой продольным разрядом постоянного тока.

4. Максимальная средняя мощность лазера в режиме свободной генерации составила ~12 Вт в диапазоне длин волн 5.1÷5.4 мкм, а его КПД достигал ~14%. Частотно-селективная генерация была получена на ~100 лазерных линиях в спектральном диапазоне 4.9-6.5 мкм со средней выходной мощностью от нескольких единиц до нескольких десятков милливатт в линии.

5. Использование двухпроходного V-образного резонатора с модуляцией добротности на основных переходах молекулы СО позволило получить генерацию импульсов излучения с минимальной длительностью 0.65 мкс (FWHM), пиковой мощностью до 3 кВт и частотой повторения импульсов до 130 Гц. При этом средняя мощность лазера достигала 0.5 Вт, лазерный спектр состоял из ~ 80 одновременно генерирующих лазерных линий в диапазоне длин волн от 4.95 до 6.75 мкм с пиковой мощностью отдельных компонент до 100 Вт.

6. Проведена оценка динамики температуры активной среды импульсно-периодического щелевого СО лазера в промежутках между импульсами накачки на основе исследования временной динамики лазерного излучения на различных спектральных компонентах, входящих в состав многочастотного излучения. Полученное время охлаждения активной среды согласуется с частотой повторения импульсов 400 Гц, при которой реализуется наибольшая эффективность работы лазера.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

А. Публикации в научных рецензируемых журналах, индексируемых в базах

Web of Science, Scopus:

- A.1. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “RF discharge slab CO laser operating in both fundamental and first-overtone bands”, Optics Communications, 2009, V.282, p.629.
- A.2. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Slab overtone CO laser operating in the 2.5 - 4.0 micron spectral range”, IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, V.45 (3), p.215.
- A.3. Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., “Криогенный щелевой лазер на окиси углерода”, Квантовая электроника, 2009, т.39, №3, с.229.
- A.4. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Rulev O.A., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Repetitively Pulsed Cryogenically Cooled Quasi Sealed-Off Slab RF Discharge First-Overtone CO Laser” Applied Physics B: Lasers and Optics, 2016, V.122:183.
- A.5. Ionin A.A., Kochetkov Yu.V., **Kozlov A.Yu.**, Mokrousova D.V., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sunchugasheva E.S., Zemtsov D.S., “Q-switched slab RF discharge CO laser”, Laser Physics Letters, 2017, V.14, 055001 (4pp).

Б. Публикации в сборниках трудов и материалах конференций:

- Б.1. Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., “Частотно-селективный щелевой СО лазер с ВЧ накачкой”, Научная сессия МИФИ 2008, 21-27 января 2008г., Москва, Россия, Сборник научных трудов, т.2, с.55.
- Б.2. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., ”Repetitively pulsed slab RF laser on fundamental and overtone transitions of CO molecule ($\lambda = 2.5\text{-}6.5 \mu\text{m}$) for

remote sensing and multicomponent gas analysis”, XV Int. Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics", June 22-29 2008r., Krasnoyarsk, Russia, Abstracts, p.38 (2008).

- Б.3. Ionin A.A., Klimachev Yu.M., **Kozlov A.Yu.**, et al., “Pulsed CO laser with active mode-locking”, Int. Conf. “Laser Optics 2008”, June 23-28, 2008, S.Petersburg, Russia, Technical Program, p. 36.
- Б.4. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., et al., “RF Discharge Slab Carbon Monoxide Laser: Overtone Lasing (2.5-4.0 μm) and Fundamental Band Tuning (5.0-6.5 μm)”, XVII Int. Symp. Gas Flow and Chemical lasers & High Power Lasers, 15-19 Sept. 2008, Lisbon, Portugal, *Program and Abstracts*, AO 03; *Proc.SPIE*, V.7131, p.713106.
- Б.5. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Slab overtone carbon monoxide laser”, “Photonics West 2009: High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications III”, January 24 – 29, 2009, San Jose, CA, USA., *Proc. SPIE*, V.7196, 71960A.
- Б.6. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Sinitsyn, “Slab overtone carbon monoxide laser excited by capacitive RF discharge: a new compact source of laser radiation within atmospheric transparency window $\sim 3.3 - 4.0$ micron”, 4th International Conference on the Frontiers of Plasma Physics and Technology, April 6-10, 2009, Kathmandu, Nepal, Book of abstracts, p.82, (2009).
- Б.7. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Compact slab overtone CO laser emitting within 2.5 - 4.0 micron wavelength range”, Abstracts of IX Int. Conf. "Atomic and molecular pulsed lasers", Russia, Tomsk, September 14-18, 2009, p.122.
- Б.8. Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., “Компактный криогенный щелевой СО-лазер с накачкой ВЧ-разрядом”, III Всероссийская молодёжная школа-семинар с международным участием «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», Программа, аннотации докладов, 25-30 октября, 2009, ФИАН, Москва, с. 32.
- Б.9. Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., "Молекулярные газовые лазеры с накачкой высокочастотным разрядом", Научная сессия НИЯУ МИФИ-2010. 25-31 января 2010г., Москва, Россия. Аннотации докладов, **2**, с.180.
- Б.10. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Slab RF discharge overtone CO laser”, ICONO/LAT 2010 Aug. 23-26, 2010, Kazan, Russia, Conference program, p.111, *Proc SPIE*, V.7994, p.79941N (2011).
- Б.11. Голубенкова М.М., Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, и др., “Щелевой обертоновый СО лазер с ВЧ возбуждением”, Научная сессия НИЯУ МИФИ-2011, 1-5 февраля 2011г., Москва, Россия, Аннотации докладов, т.2, с.83.

- Б.12.Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, Селезнев Л.В., и др.б “Обертонный СО лазер с накачкой щелевым ВЧ разрядом: компактный источник излучения в окне прозрачности атмосферы $\sim 3.0 - 4.0$ мкм”, Сборник докладов 5-ой Всероссийской школы для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов по лазерной физике и лазерным технологиям, 26 – 29 апреля 2011, г.Саров, с.154.
- Б.13.Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, Селезнев Л.В., и др.б “Щелевой обертонный СО-лазер с ВЧ возбуждением”, 5 Всероссийская молодежная конференция «Инновационные аспекты фундаментальных исследований по актуальным проблемам физики», 14–16 ноября 2011г., Сборник трудов, с.74 Москва, ФИАН.
- Б.14.Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Compact slab RF-discharge overtone CO laser”, International Conference ICONO/LAT 2013, June 23-26, 2013, Moscow, Russia, Conference program, p.116, Technical digest on CD.
- Б.15.Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Compact slab RF-discharge overtone CO laser”, 22th International Laser Physics Workshop (LPHYS’13), July 15–19, 2013, Prague, Czech Republic, Program, p. 36.
- Б.16.Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, Кочетов И.В., и др., “Криогенный ВЧ разряд: компактные СО лазеры, генерация синглетного кислорода и возбуждение ХеО”, VII Отраслевая научно-техническая конференция “Проблемы создания лазерных систем”, г. Радужный, Россия, 11-13 сентября 2013г., Тезисы докладов, с.6.
- Б.17.Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Sinitsyn D.V., “Physics and engineering of cryogenically cooled slab RF discharge first-overtone CO laser”, “The 23-th Annual International Conference on Advanced Laser Technologies ALT’15”, Faro, Portugal, September 7–11, 2015, Conference Program, p.8.
- Б.18.Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Cryogenic Plasma Chemistry of Slab RF Discharge CO Laser Active Medium”, Int. Conf. ICONO/LAT – 2016, September 26-30, Minsk, Belarus, Technical digest, LTuK24_133940.
- Б.19.Земцов Д.С., Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, и др., ”Плазмохимия активной среды криогенного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением”, III Международная конференция "Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛАПЛАЗ-2017", 24-27 января 2017г., Москва, Россия, Сборник научных трудов, с.196, М.: .
- Б.20.Ionin A.A., Kochetov I.V., **Kozlov A.Yu.**, et al., “Influence of Plasma-Chemical Processes in Active Medium of Cryogenically Cooled Sealed off Slab CO Laser on Long-Time Dynamics of Laser Characteristics”, Program of 26th annual International Laser Physics Workshop LPHYS-17, July 17-21, 2017, Kazan, Russia, p.32.

В. Иные публикации по теме диссертации:

- В.1. Ионин А.А., **Козлов А.Ю.**, Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., “Компактный

криогенный щелевой СО-лазер с накачкой емкостным ВЧ-разрядом”, Препринт ФИАН, №1, с.1-32, М., 2008.

- В.2. Ionin A.A., **Kozlov A.Yu.**, Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., “Compact slab radio-frequency discharge CO laser”, SPIE Newsroom, 26 May 2009, DOI: 10.1117/22.1200905/1626.
- В.3. Ионин А.А., Климачев Ю.М., **Козлов А.Ю.**, Котков А.А., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., “Активная среда для электроразрядного СО лазера или усилителя и способ ее накачки”, патент РФ №2354019 от 27.04.2009, Бюллетень "Изобретения. Полезные модели", № 12, с.1016, 2009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ, ЦИТИРОВАННОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ:

1. Patel S.K.N., Kerl R.J. // *Appl. Phys. Lett.*, **5**, (4), p.81, 1964.
2. Ионин А.А. “Лазеры на окиси углерода с накачкой электрическим разрядом” в кн. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы* Сер. Б, Том **XI-4**, под ред. Яковленко С.И., М., Физматлит, с.740, 2005.
3. McCord J.E., Ionin A.A., et al., // *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**(9) p.1041, 2000.
4. Ionin A.A., Kinyavskiy I.O., Klimachev Yu.M., et al., // *Opt. Lett.*, **42**(3), p.498, 2017.
5. Ionin A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., et al., // *Laser Phys.*, **20**(1), p.144, 2010.
6. Bernegger S., Sigrist M.W., // *Infrared Physics*, **30** (5), p.375, 1990.
7. Бузыкин О.Г, Иванов С.В., Ионин А.А., и др., // *Известия РАН*, **66**, (7), с.962, 2002.
8. Иванов С.В. // *Диссертация ... д-ра. физ.-мат. наук*, Институте проблем лазерных и информационных технологий РАН, М., 2006.
9. Райзер Ю.П., Шнайдер М.Н., Яценко Н.А., “Высокочастотный емкостной разряд”, М.: Изд-во Моск. физ.-техн. ин-та; Наука-Физматлит, 1995.
10. Kanazawa H., Uehara M., Matsuzaka F., Kasuja, K., // *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-30**, p.1448, 1994.
11. Hall D. R., and Baker H.J. // *Proc. SPIE*, **2502**, p12, 1995.
12. Бон В., фон Бюлов Х., Дасс Ш., и др., // *Квант. электроника*, **35** (12), с.1126, 2005.
13. Utkin Yu.G., Goshe M., Adamovich I.V., Rich J.W., // *Opt. Commun.*, **263**, p.10, 2006.
14. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., и др., // *Квант. Электроника*, **37**(3), с.231, 2007.
15. Grigoryan G.M., Kochetov I.V., Kurnosov A.K., // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**, p.085201, 2010.