

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 21 марта 2022 г. № 19

О присуждении Курносову Александру Константиновичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Теория электроразрядного СО лазера на основных и обертоновых переходах, учитывающая совокупность процессов одно- и многоквантового VV обмена» по специальности 1.3.19 – «лазерная физика» принята к защите 22 ноября 2021 года (протокол заседания № 11) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Курносов Александр Константинович, 06 октября 1952 года рождения, в 1976 г. окончил факультет молекулярной и химической физики Московского физико-технического института по специальности «Химия быстропротекающих процессов».

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика, включая квантовую радиофизику» Курносов А. К. защитил в 1985 г. в диссертационном совете, созданном при Московском физико-техническом институте (диплом ФМ № 026969).

Диссертационная работа Курносова Александра Константиновича «Теория электроразрядного СО лазера на основных и обертоновых переходах, учитывающая совокупность процессов одно- и многоквантового VV обмена», на соискание ученой степени доктора физико-математических наук выполнена в центре теоретической физики и вычислительной математики АО «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», подведомственного Госкорпорации «Росатом».

Официальные оппоненты:

1. Аполлонов Виктор Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом мощных лазеров Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук;
2. Елецкий Александр Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей физики и ядерного синтеза факультета тепловой и атомной энергетики Национального Исследовательского Университета МЭИ;
3. Иванов Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории лазерной диагностики в экологии и биомедицине Института фотонных технологий ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ), город Москва, в своем положительном заключении, подписанном кандидатом физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Научно-

исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобельцына (НИИЯФ) МГУ Рахимовой Татьяной Викторовной, доктором физико-математических наук, профессором, заведующим отделом микроэлектроники НИИЯФ МГУ Рахимовым Александром Турсуновичем, директором НИИЯФ МГУ доктором физико-математических наук, профессором, членом-корреспондентом РАН Боосом Эдуардом Эрнстовичем, и утвержденном проректором Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, доктором физико-математических наук, профессором Федяниным Андреем Анатольевичем, указала, что соискатель заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Соискатель имеет 116 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 56 работ, из них 34 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем А.К. Курносовым работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в работах:

1. Konev Yu.B., Kochetov I.V., Kurnosov A.K., and Mirzakarimov B.A. A kinetic model of multi-quantum vibrational exchange in CO // Journal of Physics D: Applied Physics. 1994, v. 27, no.10, p. 2054-2059.
2. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Конев Ю.Б., Кочетов И.В., Курносов А.К., Сеницын Д.В. Внутррезонаторное взаимодействие селективных по частоте коротких импульсов излучения СО-лазера с колебательно-возбужденной активной средой// Известия академии наук. Сер. Физ. 1999, т. 63, № 4, с. 676-682.
3. Басов Н.Г., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Котков А.А., Курносов А.К., МакКорд Дж.Е., Напартович А.П., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Хагер Г.Д., Шнырев С.Л. Импульсный лазер на первом колебательном оберitone молекулы СО, действующий в спектральном диапазоне 2.5-4.2 мкм. 3. Коэффициент

усиления и кинетические процессы на высоких колебательных уровнях //Квантовая электроника. 2002. т. 32, №5, с. 404-410.

4. Billing G.D., Coletti C., Kurnosov A.K. and Napartovich A.P. Sensitivity of molecular vibrational dynamics to energy exchange rate constants // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2003, v. 36, no.2, p. 1175-1192.

5. Курносков А.К., Напартович А.П., Шнырев С.Л. Численное исследование эффективности генерации СО лазера на обертоновых или основных переходах в зависимости от ширины спектра генерации //Квантовая электроника. 2004, т. 34, №1, с. 1-6.

6. Cacciatore M., Kurnosov A., Napartovich A., and Shnyrev S. Vibrational energy exchanges between  $N_2$  and strongly excited CO molecules: their role in vibrational kinetics//Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2004, v. 37, no.7, p. 3379-3398.

7. Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Курносков А.К., Напартович А.П., Рулев О.А., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Шнырев С.Л. Динамика коэффициента усиления в активной среде импульсного электроионизационного СО лазера: теория и эксперимент// Квантовая электроника. 2005, т. 35, №12, с. 1107-1112.

8. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю., Котков А.А., Курносков А.К., Напартович А.П., Шнырев С.Л. Влияние малых добавок кислорода на временную динамику коэффициента усиления слабого сигнала в активной среде импульсного электроионизационного СО-лазера // Квантовая электроника. 2008, т. 38, №9, с. 833-839.

9. Ionin A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Seleznev L.V. Lasers on overtone transitions of carbon monoxide molecule//Laser Physics. 2010, v.20, no.1, p.144-186.

10. Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Shnyrev S.L., and Cacciatore M.A. Database for V-V state-to-state rate constants in  $N_2$ - $N_2$  and  $N_2$ -CO collisions in a wide temperature range: dynamical calculations and analytical approximations// Plasma Sources Science and Technology. 2010, v.19, no.6, p. 045015-1-045015-13.

11. Ионин А.А., Козлов А.Ю., Кочетов И.В., Курносков А.К., Напартович А.П.,

Рулев О.А., Сеницын Д.В. Влияние добавок молекулярного кислорода на коэффициент усиления и генерационные характеристики криогенного щелевого обертонового СО-лазера с накачкой ВЧ разрядом // Квантовая электроника. 2018, т. 48, №7, с. 596-602.

12. Курносоев А.К., Напартович А.П. Динамика частотно-селективной генерации СО-лазера, перестраиваемого в широком спектральном диапазоне // Квантовая электроника. 2019. т. 49, №2, с. 98-102.

На автореферат поступили отзывы Гловы Александра Федоровича, доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника отделения перспективных разработок АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», г. Москва, и Телегина Виктора Алексеевича, кандидата физико-математических наук, ведущего научного сотрудника, и.о. заведующего лабораторией исследования неоднородностей ионосферы ИЗМИРАН, г. Москва. В отзыве доктора физико-математических наук Гловы А.Ф. отмечается актуальность и важность тематики диссертационной работы как для фундаментальных исследований процессов колебательного энергообмена, так и для исследований по физике лазеров. Отмечается научная новизна и практическая ценность полученных результатов. В отзыве кандидата физико-математических наук Телегина В.А. отмечается высокий уровень выполненных исследований и актуальность решенных задач. В отзывах на автореферат указано, что соискатель Курносоев А.К. заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается наличием у них признанных достижений в области лазерной физики и физики низкотемпературной плазмы.

Диссертационный совет отмечает, что диссертация А.К. Курносоева является законченной научно-исследовательской работой, в которой для корректного описания характеристик электроразрядных СО лазеров на основных и обертоновых переходах между высокими колебательными уровнями

молекул СО в диапазонах длин волн 5.4-8.7 мкм и 2.7-4.2 мкм обобщаются разработанные ранее теоретические модели электроразрядных СО лазеров. Для обобщения этих моделей потребовались дополнительные данные о константах скорости процессов колебательно-колебательного (VV) обмена в смесях газов СО:N<sub>2</sub> в широких диапазонах колебательных квантовых чисел молекул. Для расчетов необходимых констант в работе использовался современный теоретический метод, основанный на полуклассическом приближении, обеспечивший наиболее корректное на сегодняшний день теоретическое описание процессов колебательного энергообмена в активной среде СО лазера. Результаты этих расчетов были верифицированы путем сравнения с экспериментальными данными и с расчетными результатами других авторов.

Обобщенная теоретическая модель используется в диссертационной работе для решения ряда актуальных задач физики электроразрядных СО лазеров, работающих на переходах между высокими колебательными уровнями молекул СО. Полученные результаты характеризуются научной новизной и имеют важное практическое и научное значение. Актуальность выполненных исследований для лазерной физики связана с тем, что разработанная модель корректно описывает характеристики электроразрядного СО лазера на основных и обертоновых переходах в спектральных диапазонах (5.÷8.7) и (2.5÷4.2) мкм, которые характеризуются значительным перекрытием с окнами прозрачности атмосферы и представляют интерес для различных приложений.

На основании выполненных соискателем исследований диссертационный совет отмечает следующие основные результаты работы:

1. Разработана теоретическая модель электроразрядного СО лазера, учитывающая совокупность одноквантовых, многоквантовых и асимметричных процессов колебательного энергообмена в его активной среде на основе современного полуклассического приближения для расчета констант скорости указанных процессов и позволяющая корректно описывать характеристики электроразрядного СО лазера на основных и обертоновых переходах в спектральных диапазонах (5.÷8.7) и (2.5÷4.2) мкм.

2. Выполнена верификация новой теоретической модели путем сравнения теории с экспериментом по характеристикам электроразрядного СО лазера, подтверждающая достоверность рассчитанных автором характеристик СО лазеров, работающих в диапазонах длин волн (2.5÷4.2) и (5.÷8.7) мкм, и обоснованность выводов, сделанных на основании этих результатов.
3. Новая теоретическая модель хорошо описывает время восстановления инверсной населенности после короткого (~1 мкс) импульса частотно-селективной генерации СО лазера на переходах с верхним колебательным уровнем  $v > 14$ , в то время как разработанные ранее модели, учитывающие лишь одноквантовые процессы VV обмена, занижают время восстановления на этих переходах в 2-3 раза.
4. Установлен верхний предел КПД СО лазера на оберлоне на уровне 20%. При узкополосной генерации на переходах основной полосы или обертона в пяти соседних полосах с колебательным числом самого верхнего лазерного уровня от  $v=17$  до  $v=36$  КПД СО лазера достигает 50% от значений КПД в неселективном режиме.
5. Определены и верифицированы константы скорости процессов VV' обмена между молекулами СО на уровнях  $v = (18÷24)$  и молекулами O<sub>2</sub> на нижних уровнях, способных оказывать сильное влияние на характеристики СО лазера на переходах между высокими колебательными уровнями. Выполнено обобщение теоретической модели, позволяющее корректно учитывать эти процессы в расчетах лазерных характеристик при наличии в активной среде добавок O<sub>2</sub> с относительной концентрацией  $0.05 < ([O_2]/[CO]) < 0.2$ .
6. Процессы асимметричного VV и VV' обмена двух квантов молекулы СО на высоких колебательных уровнях на один квант молекул СО или N<sub>2</sub> на нижних уровнях ограничивают ИК границы спектров излучения частотно-селективных СО лазеров на основных и оберлонных переходах на уровне 8.9

мкм и 4.3 мкм, что соответствует переходам с верхним колебательным уровнем  $v < 41$ .

Все основные научные результаты, включенные в диссертацию Курносова А.К., получены лично автором либо при его непосредственном участии, являются оригинальными и научно обоснованными. Экспериментальные исследования, результаты которых опубликованы в работах, вошедших в список основных публикаций автора по теме диссертации, проводили научные сотрудники лаборатории Газовых лазеров ФИАН: А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков, О.А. Рулев, Л.В. Селезнев, Д.В. Сеницын, Ю.В. Терехов. Автор проанализировал экспериментальные данные путём их сопоставления с результатами расчётов, которые были получены автором при численном моделировании проведённых экспериментов. Это же касается и экспериментальных исследований, которые выполняли научные сотрудники ГНЦ РФ ТРИНИТИ А.Д. Белых, В.А. Гурашвили, Е.А. Киселев, В.Н. Кузьмин, В.М. Путилин, Н.Г. Туркин и научный сотрудник СПбГУ Г.М. Григорян.

Материалы диссертации Курносова А.К. характеризуются значительной научной новизной:

1. В работе предложена и реализована новая концепция теоретической модели СО лазера, в которой описание процессов колебательного энергообмена в активной среде, обеспечивающих возникновение и поддержание инверсной населенности, основано на результатах полуклассических вычислений констант скорости элементарных процессов одноквантового, многоквантового и асимметричного  $VV$  и  $VV'$  обмена в смеси газов  $CO:N_2$ .
2. Впервые найдены константы скорости квазирезонансных процессов  $VV'$  обмена между молекулами СО на уровнях  $v = (18 \div 24)$  и невозбужденными молекулами  $O_2$ .
3. Впервые установлено, что сильное влияние добавок  $O_2$  с относительной концентрацией  $0.05 < [O_2]/[CO] < 0.2$  на динамику коэффициента усиления слабого сигнала в активной среде СО лазера на переходах с верхним уровнем

$v > 17$  объясняется указанными процессами  $VV'$  обмена.

4. Впервые обоснована ИК граница спектра излучения СО лазера, соответствующая в безазотной активной среде переходам с верхним лазерным уровнем  $v \leq 40$ , а в азотсодержащих смесях переходам с верхним лазерным уровнем  $v \leq 38$ .

5. Впервые теоретически обоснована возможность экспериментального исследования процессов энергообмена электронов в разряде и молекул СО на высоких колебательных уровнях методом лазерного зондирования активной среды электроионизационного СО лазера при использовании двух последовательных коротких ( $\sim 10$  мкс) импульсов накачки.

Научная новизна результатов подтверждается и их публикацией в ведущих рецензируемых журналах с 1988г. по 2019 г.

Разработанная в диссертации Курносова А.К. теоретическая модель и полученные с ее помощью результаты имеют большое практическое значение для разработки электроразрядных СО лазеров, работающих в спектральных диапазонах (2.5÷4.2) и (5.÷8.7) мкм. В связи с этим необходимо отметить следующие результаты.

1. Верхний предел КПД СО лазера на оберлоне составляет 20%.
2. КПД СО лазера при узкополосной генерации на переходах в пяти соседних колебательных полосах на оберлонных или основных переходах может достигать 50% от значений КПД в неселективном режиме, что имеет большое практическое значение в связи с прогрессом технологий изготовления многослойных диэлектрических фильтров.
3. Увеличение плотности активной среды электроионизационного СО лазера с 0.2 Амага до 0.8 Амага при неизменном удельном энерговкладе приводит более чем к десятикратному росту максимальной мощности лазерного излучения в селективном режиме на переходах основной полосы или обертона с верхним лазерным уровнем  $v > 22$ .
4. Теоретическая модель корректно учитывает влияние примесей молекулярного кислорода с относительной концентрацией  $0.05 < [O_2]/[CO] < 0.2$  в

активной среде на характеристики СО лазера на переходах с верхним лазерным уровнем  $v > 17$ .

5. Приведенные в диссертации подробные данные о константах скорости процессов VV обмена в смесях CO:N<sub>2</sub> представляют практический интерес для исследователей, работающих в таких областях как газовые лазеры, низкотемпературная плазма, физика атмосферы. Это касается и найденных в работе констант скорости VV' обмена между молекулами СО и О<sub>2</sub>. Компьютерные коды и методики расчетов, разработанные при выполнении диссертационной работы, можно использовать в исследованиях механизмов и кинетики различных физико-химических процессов с участием колебательно-возбужденных двухатомных молекул.

Результаты диссертационной работы Курносова А.К. рекомендуются к использованию в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Институте общей физики РАН им. А.М. Прохорова, Институте спектроскопии РАН, Институте фотонных технологий РАН, Московском государственном университете, ГНЦ РФ ТРИНИТИ и Санкт-Петербургском государственном университете.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

В ходе защиты соискатель Курносов А.К. ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 21 марта 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Курносову А.К. учёную степень доктора физико-математических наук за решение важной научной проблемы – создание теоретической модели электроразрядного СО лазера, работающего на основных и обертоновых переходах в спектральных диапазонах (2.5÷4.2) и (5.÷8.7) мкм, имеющих большое научное и практическое значение, на основе учета совокупности процессов одно- и многоквантового VV обмена и использования современного полуклассического приближения для расчетов констант скорости этих процессов в активной среде лазера.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 23 человека, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.19 – Лазерная физика), участвовавшие в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени -19 ,  
против присуждения учёной степени -4 ,  
недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета,  
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н.

Колачевский Николай Николаевич

Учёный секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

Золотько Александр Степанович

21 марта 2022 г.