

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор
Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова

профессор А. А. Федянин

января 2022 г.



О Т З Ы В

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию Курносова Александра Константиновича «Теория электроразрядного СО лазера на основных и обертоновых переходах, учитывающая совокупность процессов одно- и многоквантового VV обмена», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Процессы VV обмена в смесях CO:N_2 с участием молекул СО на высоких колебательных уровнях оставались в течении длительного времени слабо изученными. Это не позволяло корректно описывать колебательную кинетику в указанных смесях в широких диапазонах колебательных уровней молекул СО и N_2 , в частности, в активной среде электроразрядного СО лазера. Разработанные ранее теоретические модели хорошо описывали характеристики СО лазера с криогенным охлаждением, работающего, как правило, на переходах с верхним лазерным уровнем $v < 12$. В этих моделях описание колебательной кинетики основывалось на экспериментальных данных о константах скорости одноквантового VV обмена между молекулами СО на нижних уровнях. Применение разработанных ранее моделей для расчета характеристик СО лазера на обертоне и в селективных режимах на переходах между колебательными уровнями в диапазоне $v = 12 \div 39$ не имело обоснования, т.к. не учитывало специфику процессов VV обмена в данном диапазоне уровней. Конкретных данных о механизмах и константах скорости процессов VV обмена с участием молекул СО на высоких уровнях было известно крайне мало. Данная проблема не была решена в течение длительного времени.

Для решения проблемы в диссертации Курносова А.К. построена теоретическая модель СО лазера, в которой при описании колебательного энергообмена в активной среде, содержащей смесь газов CO:N_2 , используются константы скорости элементарных процессов одноквантового, многоквантового и асимметричного VV и VV' обмена между молекулами данной смеси, рассчитанные в полуклассическом приближении.

Актуальность работы. Результаты диссертации представляют фундаментальный интерес как для понимания механизмов VV обмена с участием молекул CO и N₂ на высоких колебательных уровнях и молекул O₂, так и для наиболее корректного описания констант скорости этих процессов. Актуальность разработанной теоретической модели связана с освоением спектральных диапазонов (2.7÷4.2) и (5.4÷8.7) мкм, в которых генерация CO лазера на обертоновых и основных переходах возможна на большом числе колебательно-вращательных переходов. Указанные диапазоны в значительной мере (особенно при генерации на обертоне) перекрываются с окнами прозрачности атмосферы и представляют значительный интерес для спектроскопии и лазерных технологий, т.к. в этих диапазонах лежит множество полос поглощения различных веществ.

Содержание и завершённость диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех содержательных глав, заключения, списка основных публикаций автора по теме диссертации в реферируемых журналах и в трудах конференций, списка цитированной литературы из 253 наименований. Общий объем диссертации составляет 265 страниц, включая 93 рисунка, 29 таблиц и два приложения. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и решаемые задачи, представлена практическая значимость и научная новизна полученных результатов, приведены защищаемые положения, описан личный вклад автора.

Первая глава посвящена описанию методики и результатов полуклассических расчетов констант скорости процессов VV обмена между CO и N₂, а также между молекулами N₂. Здесь же приведены результаты расчетов констант скорости процессов VT релаксации в азоте. Обсуждается проблема выбора поверхностей потенциальной энергии сталкивающихся молекул, для которых выполнялись расчеты молекулярной динамики. Результаты полуклассических вычислений, представленные в этой главе, верифицируются путем сравнения с экспериментом и сопоставляются с результатами расчетов других авторов. В этой же главе предложены аналитические аппроксимации, хорошо описывающие результаты полуклассических вычислений констант скорости процессов одноквантового VV обмена при бинарных столкновениях CO-N₂ и N₂-N₂.

Во второй главе представлен обзор литературы по проблеме корректного описания процессов VV обмена с участием молекул CO и N₂ в широком диапазоне колебательных уровней. Описана новая теоретическая модель CO лазера, в которой при описании процессов VV обмена с разным числом обмениваемых квантов, используются константы скорости, рассчитанные в полуклассическом приближении. Представлены результаты верификации теоретической модели на основе сопоставления теории и эксперимента по динамике восстановления инверсии населенностей на отдельных переходах в активной среде после генерации короткого импульса частотно-селективного излучения. Показана существенно лучшая применимость новой модели при описании такой динамики на переходах с верхним лазерным уровнем $v > 14$ по

сравнению с разработанной ранее моделью, учитывающей лишь процессы одноквантового VV обмена. Описаны уравнения активной среды, используемые в расчетах характеристик электроразрядного СО лазера.

В третьей главе выполнено сопоставление результатов зондирования коэффициента усиления слабого сигнала (КУСС) на переходах основной полосы в смесях СО:Не и СО:Н₂ в активной среде импульсного СО лазера и результатов расчетов динамики КУСС. Данное сопоставление подтвердило хорошую применимость новой теоретической модели для описания динамики КУСС в широком диапазоне переходов, при различных значениях энерговклада в разряде и при различном составе активной среды. Описаны возможности выявления роли различных кинетических процессов в активной среде СО лазера при сопоставлении теории и эксперимента по динамике КУСС. В результате анализа результатов диагностики КУСС в смеси СО:Не:О₂ при малых концентрациях О₂ найдены значения констант скорости близких к резонансу процессов VV' обмена между молекулами СО на уровнях $v=18\div 24$ и невозбужденными молекулами О₂. Также рассмотрена возможность выявления по динамике КУСС роли процессов энергообмена между электронами и молекулами СО на высоких колебательных уровнях. Предложена методика исследования таких процессов, основанная на использовании двух последовательных разрядных импульсов в активной среде электроионизационного СО лазера. Выполнена оценка необходимых для реализации данной методики параметров накачки и активной среды,

В четвертой главе приведены результаты исследования характеристик СО лазера на обертоном – перспективного источника излучения в диапазоне длин волн (2.5÷4.2) мкм. Описаны физические особенности такого лазера. Выполненное сопоставление расчетных и экспериментально измеренных характеристик данного лазера выявило их хорошее согласие. Приведены результаты расчетов частотно-селективных режимов работы импульсных электроразрядных СО лазеров на обертоновых и основных переходах, в том числе при генерации на нескольких переходах соседних колебательных полос в зависимости от расположения и ширины «спектрального окна» резонатора. Использование новой теоретической модели позволило существенно уточнить прогноз энергетических характеристик лазера в частотно-селективных режимах. Для таких режимов работы сформулированы условия, при которых процессы асимметричного VV и VV' обмена двух квантов СО на высоких уровнях на один квант молекул N₂ и СО на нижних уровнях должны приводить к увеличению КПД лазера. Для частотно-селективного режима генерации приведена расчетная динамика излучения импульсного СО лазера на отдельных переходах в широком диапазоне верхних лазерных уровней. Импульсы лазерного излучения на переходах между более высокими уровнями характеризуются существенно большей длительностью и меньшей мощностью излучения. Мощность излучения частотно-селективного импульсного СО лазера на переходах между высокими колебательными

уровнями может многократно возрасти при увеличении плотности активной среды с сохранением величины удельного энерговклада на молекулу.

В заключении кратко сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

В приложениях I и II приведены константы скорости большого числа процессов VV и VV' обмена между различными молекулами в смесях $CO:N_2$, рассчитанных в полуклассическом приближении в широких диапазонах колебательных уровней и температуры газа. Эти данные, лежащие в основе описанной в диссертации теоретической модели, представляют интерес и для исследований по низкотемпературной плазме и физике атмосферы.

Диссертация Курносова А.К. является серьезным и завершённым научным исследованием в области лазерной физики. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Научная новизна работы

Материалы диссертации Курносова А.К. характеризуются значительной научной новизной. В частности, хотелось бы отметить следующие результаты, важные для физики CO лазера. В основе представленной в работе теоретической модели CO лазера лежат наиболее полные и корректные на сегодняшний день данные о константах скорости процессов VV обмена с разным числом обмениваемых квантов, полученные в результате полуклассических вычислений. В процессе верификации этой модели установлено, что она существенно лучше описывает характеристики частотно-селективных CO лазеров на переходах с верхним уровнем $v > 14$, чем разработанная ранее модель, учитывающая лишь процессы одноквантового VV обмена. При анализе динамики КУСС в смесях с малыми добавками O_2 найдены константы скорости близких к резонансу процессов VV' обмена между молекулами CO на высоких колебательных уровнях $v = (18 \div 24)$ и молекулами O_2 на нижних. Сильное влияние таких добавок на динамику КУСС на переходах между высокими колебательными уровнями объясняется указанными процессами VV' обмена. Учет в теоретической модели процессов асимметричного VV и VV' обмена двух квантов молекулы CO на высоких колебательных уровнях на один квант CO или N_2 на нижних уровнях позволил объяснить наблюдаемый в экспериментах эффект значительного уменьшения колебательных населенностей молекул CO на уровнях $v > 40$ и обосновать ИК границу спектра излучения CO лазера переходами с верхним лазерным уровнем $v < 41$.

Практическая значимость исследования

Выполненное в работе сопоставление теории и эксперимента по характеристикам CO лазера в диапазоне верхних лазерных уровней $v = (5 \div 38)$ подтверждает практическую значимость разработанной теоретической модели при исследованиях и разработках CO лазеров, работающих в диапазонах длин волн $(2.5 \div 4.2)$ и $(5 \div 8.7)$ мкм, для различных технологических применений. С помощью этой модели получены обоснованные прогнозы характеристик CO лазера на переходах между

высокими колебательными уровнями. В частности, определен верхний предел КПД СО лазера на оберitone, составляющий 20%. Показано, что с увеличением плотности активной среды возможно значительное (на порядок величины и более) увеличение мощности лазерного излучения в селективном режиме на основных или оберитонных переходах с верхним лазерным уровнем $v > 22$. Выполненное обобщение теоретической модели СО лазера для смесей СО:Не:О₂ позволяет учитывать сильное влияние малых добавок молекулярного кислорода на характеристики СО лазера на переходах с верхним лазерным уровнем $v > 17$.

Результаты диссертационной работы Курносова А.К. могут быть рекомендованы 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.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений. На всех этапах разработки новой теоретической модели достоверность кинетических коэффициентов, лежащих в ее основе, подтверждается путем сравнения с экспериментальными данными и расчетными результатами других авторов. Выполненная верификация теоретической модели на основе сопоставления теории и эксперимента по характеристикам СО лазера на основных и оберитонных переходах подтверждает ее обоснованность и достоверность полученных прогнозов характеристик СО лазеров, работающих в диапазонах длин волн (2.5÷4.2) и (5÷8.7) мкм. Основные результаты диссертации опубликованы в 34 статьях в научных журналах, включенных в перечень ВАК и индексируемых в базе данных Web of Science, в 22 сборниках трудов международных конференций и хорошо известны специалистам.

Замечания к диссертационной работе.

1. В расчетах констант скорости процессов VV обмена молекул СО и N₂ на высоких колебательных уровнях используются собственные значения энергии потенциала Морзе, но границы применимости этого приближения не анализируются.

2. При описании кинетики молекул СО на высоких колебательных уровнях не учтены квазирезонансные процессы передачи колебательной энергии, приводящие к заселению электронно-возбужденных состояний СО(A¹Π).

Указанные замечания не снижают научной ценности, новизны и актуальности результатов, представленных в диссертации Курносова А.К.

Заключение. Диссертация Курносова А.К. «Теория электроразрядного СО лазера на основных и оберитонных переходах, учитывающая совокупность процессов одно- и многоквантового VV обмена» является законченным научным исследованием и соответствует критериям, установленным

Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09. 2013 г., а сам Курносков Александр Константинович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 – лазерная физика.

Доклад Курносова А.К. по материалам диссертации заслушан на Семинаре отдела микроэлектроники Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д.В. Скобелыцина Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова 12 января 2022 г.

Отзыв на диссертацию составлен ведущим научным сотрудником ОМЭ НИИЯФ МГУ к.ф.-м.н. Рахимовой Т. В. и одобрен на семинаре ОМЭ НИИЯФ МГУ 12 января 2022 г.

Ведущий научный сотрудник отдела
микроэлектроники НИИЯФ МГУ, к.ф.м.н.

Рахимова Татьяна Викторовна

тел.: 8-495-939-49-37, e-mail: trakhimova@mics.msu.su

Заведующий отделом микроэлектроники
НИИЯФ МГУ д.ф.м.н, профессор

Рахимов Александр Турсунович

тел.: 8-495-939-21-66, e-mail: arakhimov@mics.msu.su

Директор НИИЯФ МГУ д.ф.-м.н.,
профессор, член-корреспондент РАН

Боос Эдуард Эрнстович

119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

тел.: 8-495-939-18-18, e-mail: info@sinp.msu.ru

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Список основных работ сотрудников отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ по теме защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет.

1. N₂ dissociation and kinetics of N(4S) atoms in nitrogen DC glow discharge, A.V. Volynets, D.V. Lopaev, T.V. Rakhimova, A.A. Chukalovsky, Yu.A. Mankelevich, N.A. Popov, A.I. Zotovich and A.T. Rakhimov, J. Phys. D.: Appl. Phys. 2018, V. 51 issue 36, 364002

2. Oxygen (3P) atom recombination on a Pyrex surface in an O₂ plasma.

J. P. Booth, O. Guaitella, A. Chatterjee, C. Drag, V. Guerra, D. Lopaev, S. Zyryanov, T. Rakhimova, D. Voloshin and Yu. Mankelevich, Plasma Sources Sci. Technol. 28 (2019) 055005

3. Argon clustering in silicon under low-energy irradiation: Molecular dynamics simulation with different Ar-Si potentials, Sycheva A.A., Voronina E.N., Rakhimova T.V., Rakhimov A.T.

Journal of Vacuum Science and Technology A, (2018) 36, 061303

4. Popov N., Babaeva N., Naidis G., Recent advances in the chemical kinetics of non-equilibrium plasmas, Journal of Physics D: Applied Physics. (2019), 52, 160301

5. OH radical kinetics in hydrogen-air mixtures at the conditions of strong vibrational nonequilibrium, Winters C., Jans E., Eckert Z., Frederickson K., Adamovich I., Popov N.

Journal of Physics D (Applied Physics), (2017) 50, 505203

6. Determination of absolute O(3P) and O₂(a¹Δ_g) densities and kinetics in fully modulated O₂ dc glow discharges from the O₂(X³Σ_g⁻) afterglow recovery dynamics, Booth J-P, Chatterjee A., Guaitella O., Santos Sousa J., Lopaev D., Zyryanov S., Rakhimova T., Voloshin D., Mankelevich Yu, de Oliveira N., Nahon L, Plasma Sources Science and Technology, (2020) 29, 115009

7. Imaging and Modeling C₂ Radical Emissions from Microwave Plasma-Activated Methane/Hydrogen Gas Mixtures: Contributions from Chemiluminescent Reactions and Investigations of Higher-Pressure Effects and Plasma Constriction., J.P. P. Gore, E.J.D. Mahoney, J.A. Smith, M.N.R. Ashfold, Yu. A. Mankelevich., J. Phys. Chem. A 2021, 125, 4184–4199,

8. Multifold study of volume plasma chemistry in Ar/CF₄ and Ar/CHF₃ CCP discharges, Proshina O., Rakhimova T., Zotovich Alexey, Lopaev D., Zyryanov S., Rakhimov A., Plasma Sources Science and Technology, (2017), 26, 075005