

*на правах рукописи*

КЛИМАЧЕВ Юрий Михайлович

**ДИНАМИКА КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ НА ВЫСОКИХ  
КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДАХ МОЛЕКУЛЫ ОКИСИ  
УГЛЕРОДА В ГАЗОВЫХ СРЕДАХ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ  
ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОИОНИЗАЦИОННЫМ РАЗРЯДОМ**

*специальность 01.04.21 лазерная физика*

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**Москва 2008**

Работа выполнена в Физическом Институте им. П.Н. Лебедева РАН

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор Ионин Андрей Алексеевич

**Научные консультанты:** кандидат физико-математических наук,  
доцент Котков Андрей Александрович;  
кандидат физико-математических наук  
Синицын Дмитрий Васильевич.

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
профессор Петраш Георгий Георгиевич (ФИАН)  
доктор физико-математических наук,  
профессор Гурашвили Виктор Арчельевич (ТРИНИТИ)

**Ведущая организация:** Государственное унитарное предприятие "Научно-  
производственное объединение Астрофизика"  
(ГУП "НПО Астрофизика", Москва)

Защита диссертации состоится " 31 " марта 2008 г. в 12 час.  
на заседании Диссертационного Совета Д.002.023.03  
в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН

Адрес: 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53,  
Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН,  
Ученому секретарю Диссертационного Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института  
им. П.Н. Лебедева РАН по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2008 г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета  
доктор физико-математических наук, профессор

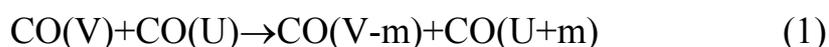
Шиканов А.С.

### Актуальности темы диссертационной работы

Среди молекулярных лазеров, действующих в средней инфракрасной области спектра, лазеры на окиси углерода выделяются высокой эффективностью и широким диапазоном перестройки частоты излучения [1-3]. Применение электроионизационного (ЭИ) метода накачки активной среды (АС) СО лазера [4] в сочетании с ее охлаждением до температур  $\sim 100$  К позволило достигнуть эффективности преобразования энергии накачки в энергию когерентного излучения  $\sim 50\div 60\%$  [5, 6].

Спектр излучения СО лазера, который действует на фундаментальных (основных) колебательно-вращательных переходах, т.е. с изменением номера колебательного уровня на единицу ( $V \rightarrow V-1$ ), лежит в диапазоне длин волн от  $\sim 4.7$  мкм, колебательная полоса  $1 \rightarrow 0$ , [7] до  $\sim 8.2$  мкм, колебательная полоса  $37 \rightarrow 36$  [8]. Вместе с тем, электроразрядный СО лазер может работать и на переходах первого колебательного обертона ( $V \rightarrow V-2$ ) молекулы СО [9, 10]. В настоящее время генерация излучения обертонового СО лазера получена на  $\sim 400$  колебательно-вращательных переходах в диапазоне длин волн от  $\sim 2.5$  мкм (полоса  $6 \rightarrow 4$ ) до  $\sim 4.2$  мкм (полоса  $38 \rightarrow 36$ ) [11-13]. Повышенный интерес к обертоновому СО лазеру связан с тем, что его спектральный диапазон перекрывает "окно прозрачности" атмосферы (спектральная область с малым поглощением) в диапазоне от 3.3 мкм до 4.1 мкм [14-15], что позволяет транспортировать лазерное излучение в атмосфере с минимальными потерями. Кроме того, множество спектральных линий обертонового СО лазера совпадает с линиями поглощения как простых веществ, так и органических соединений [16], что дает возможность использовать излучение обертонового СО лазера в лазерной химии и лазерной спектроскопии.

Следует отметить, что генерация излучения обертонового СО лазера с длиной волны более 3 мкм происходит на высоких ( $V > 15$ ) колебательно-вращательных переходах [13]. На таких высоких переходах начинают проявляться процессы многоквантового колебательного обмена (МКО) [17-19], которые оказывают влияние на формирование и релаксацию колебательной функции распределения (КФР) молекул СО в АС лазера. Авторы указанных работ показали, что когда вероятность обмена  $m$ -квантами



приближается к единице, в соответствии с общими принципами квантовой механики становятся существенными процессы обмена  $m+1$  квантами. Как

следует из работы [19], константы скорости процессов (1) с  $m=2, 3$  примерно равны константам скорости одноквантовых процессов в диапазоне  $V \sim 10 \div 30$ .

Развитие теоретической модели кинетики АС электроразрядных СО лазеров с учетом МКО осуществлено в работе [20]. Были произведены сравнения результатов расчетов по моделям одноквантового колебательного обмена (ОКО) и МКО не только стационарных КФР молекул СО, но и динамики их установления и релаксации при импульсном возбуждении. Было показано, что стационарные КФР слабо зависят от выбора модели колебательно-колебательного (VV) обмена. Поэтому представляют интерес те эксперименты, в которых можно было бы обнаружить существенные отличия между моделями.

Кроме того, характерные времена формирования инверсной населенности (ИН), а, следовательно, и динамика коэффициента усиления слабого сигнала (КУСС), очень важны для быстропроточных СО лазеров как с поперечной прокачкой активной среды [9, 21-24], так и с продольной [25-27], поскольку эти времена нужно учитывать при разработке конструкции этих лазеров. Таким образом, возникает необходимость в исследовании динамики КУСС в АС СО лазера в различных экспериментальных условиях, в частности, характерных, для СО лазеров с быстрой прокачкой активной среды. Причем, наиболее важные из этих условий (удельный энерговклад, плотность и состав газовой смеси) можно промоделировать на импульсной ЭИ СО лазерной установке со стационарным криогенным охлаждением активной среды.

В СО лазере зависимость КУСС от температуры играет особенно существенную роль [28]. Известно, что трудно измерять температуру газа непосредственно в области электрического разряда [29]. Это позволяет сделать метод многочастотного зондирования АС импульсного СО лазера излучением непрерывного СО лазера [30]. Однако, реализованная в [30] точность измерения КУСС в 10% приводит к высокой ( $\sim 200$  К) погрешности определения температуры газа при использовании такой методики [31]. Для повышения точности необходимо увеличить число зондируемых переходов в несколько раз.

Температура газа также является важным фактором, влияющим на пороговое значение содержания синглетного кислорода в кислород-иодных лазерах как химических [32, 33], так и электроразрядных [34]. Электроразрядный генератор синглетного кислорода может быть создан и на основе ЭИ разряда. Как было показано в наших работах [7\*-8\*] ЭИ разряд в кислороде стабилизируется при помощи добавления небольшого количества окиси углерода. Этот факт открывает возможность детектирования динамики

температуры в кислородных смесях с накачкой в ЭИ разряде при помощи многочастотного зондирования излучением непрерывного СО лазера.

**Целью диссертационной работы** является экспериментальное исследование динамики КУСС на высоких ( $V \geq 15$ ) основных ( $V \rightarrow V-1$ ) и обертоновых ( $V \rightarrow V-2$ ) переходах молекул СО, возбужденных в импульсном ЭИ разряде в широком диапазоне экспериментальных условий, для обоснования теории многоквантового колебательного обмена; получения информации о характерных временах формирования и жизни инверсной населенности, необходимой для оптимизации работы быстропроточных электроразрядных СО лазеров; а также измерения динамики температуры газовых сред, содержащих возбужденные молекулы СО, методом многочастотного лазерного зондирования, в том числе в смесях с большим содержанием кислорода, разряд в которых стабилизирован небольшими добавками молекул СО.

Эксперименты проводились на криогенных ЭИ лазерных установках в лаборатории Газовых лазеров Отделения Квантовой Радиофизики (ОКРФ) Физического Института им. П.Н. Лебедева Российской Академии наук (ФИАН, г. Москва) в рамках совместного экспериментально-теоретического исследования кинетических процессов, происходящих в АС ЭИ СО лазера. Теоретические расчеты были проведены в ГНЦ РФ Троицком Институте инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ, г.Троицк, Моск. обл.) профессором доктором физ.-мат. наук А.П. Напартовичем и кандидатами физ.-мат. наук А.К. Курносовым И.В. Кочетовым, и С.Л. Шныревым совместно с профессором доктором физ.-мат. наук Коневым Ю.Б. (Институт высоких температур РАН).

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан метод двойной модуляции добротности резонатора (МДР) в селективном ЭИ СО лазере для исследования кинетики обмена колебательными квантами молекул СО. Измерено время восстановления инверсной населенности на выделенных колебательно-вращательных переходах колебательных полос от  $5 \rightarrow 4$  до  $33 \rightarrow 32$  включительно. На основе сравнения полученных экспериментальных результатов с теоретически рассчитанными, выполненными на основе моделей МКО и ОКО, показано, что только модель МКО позволяет адекватно описать результаты проведенного эксперимента.

2. Измерена динамика нарастания (передний фронт) КУСС на высоких обертоновых переходах ЭИ СО лазера от  $20 \rightarrow 18$  до  $36 \rightarrow 34$  для смесей СО:Не и СО:N<sub>2</sub> при различных удельных энерговкладах с помощью метода изменяемых

внутрирезонаторных потерь (ИВП) на временах до 0,5 мс после начала импульса накачки. Подтверждена необходимость использования модели МКО, включающей процессы несимметричного VV обмена, для описания характеристик импульсного ЭИ СО лазера на высоких обертоновых переходах.

3. Измерена временная зависимость КУСС на высоких  $15 < V < 32$  основных колебательно-вращательных переходах молекулы СО в ЭИ лазерном усилителе на временах существования ИН (несколько миллисекунд) в широком диапазоне экспериментальных условий с помощью специально разработанного и созданного непрерывного селективного СО лазера. На основе сравнения экспериментально полученных временных зависимостей КУСС с результатами расчетов, выполненных на основе моделей МКО, произведена оценка локального удельного энерговклада в различные газовые смеси ЭИ лазерного СО усилителя.

4. Применительно к АС импульсного ЭИ СО усилителя усовершенствован метод многочастотного лазерного зондирования, что позволило значительно увеличить точность измерения динамики температуры АС и населенностей колебательных уровней молекул СО. На основе этого метода при зондировании излучением пробного непрерывного СО лазера на 10 колебательно-вращательных переходах измерена динамика температуры после импульса ЭИ разряда с точностью  $\sim 3 \div 6 \%$  в смесях СО:Не, СО:N<sub>2</sub> и СО:O<sub>2</sub>.

5. Осуществлена стабилизация ЭИ разряда в кислороде за счет небольших добавок молекул СО или Н<sub>2</sub>, что позволило повысить удельный энерговклад в кислород в десятки раз. Получена генерация в криогенном ЭИ СО лазере на смесях с большим (до 95%) содержанием молекул O<sub>2</sub> и измерена динамика КУСС в такой АС.

В диссертации **автор защищает следующие положения:**

1. Время восстановления инверсной населенности на колебательных переходах основной полосы от  $5 \rightarrow 4$  до  $33 \rightarrow 32$ , измеренное при помощи метода двойной МДР в селективном ЭИ СО, лазере составляет  $1.8 \div 6.3$  мкс в зависимости от экспериментальных условий. Как свидетельствует сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретически рассчитанными на основе моделей МКО и ОКО, именно модель МКО наиболее адекватно описывает экспериментальные данные.

2. В импульсном ЭИ СО лазерном усилителе время жизни ИН на колебательно-вращательных переходах молекулы СО составляет несколько миллисекунд в зависимости от экспериментальных условий. Максимальное

значение КУСС в оберточной полосе достигает  $0.43 \text{ м}^{-1}$  (переход 33→31). Локальный удельный энерговклад может быть определен на основе сравнения экспериментально полученных временных зависимостей КУСС для основных и оберточных переходов с результатами расчетов на основе модели МКО. Зависимость максимального значения КУСС от номера колебательного уровня на высоких, вплоть до 38→36, оберточных переходах в азотных смесях подтверждает существование несимметричного  $VV'$ -обмена между молекулами  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}$ .

3. При увеличении доли кислорода  $X$  в смесях  $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$  максимум КУСС  $G_{\text{max}}$  на низких ( $6 \leq V \leq 13$ ) основных переходах возрастает за счет роста населенности на соответствующих колебательных уровнях. На переходе 10→9  $P(15)$  при  $X=2.0$  значение  $G_{\text{max}}$  в 6 раз больше, чем для смеси без кислорода ( $X=0$ ). Время существования инверсной населенности при увеличении  $X$  сокращается. Эффективность генерации ЭИ СО лазера с кислородосодержащей газовой смесью на основных переходах достигает 47%.

4. Увеличение точности измерения до 3÷6 % временной зависимости температуры АС и населенностей колебательных уровней молекул СО, возбуждаемых импульсным ЭИ разрядом, достигается за счет использования метода многочастотного лазерного зондирования АС излучением пробного непрерывного СО лазера на 10 колебательно-вращательных переходах. Метод позволяет измерить динамику температуры на временах до 1 мс в смесях  $\text{CO}:\text{He}$  и  $\text{CO}:\text{N}_2$  (начальная температура  $T \sim 100 \text{ К}$ ), а также в кислородосодержащих смесях (начальная температура  $T \sim 100 \text{ К}$  и  $\sim 300 \text{ К}$ ), ЭИ разряд в которых стабилизирован за счет небольших ( $\sim 1 \div 10\%$ ) добавок окиси углерода.

Все перечисленные в защищаемых положениях результаты получены впервые.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что результаты экспериментального исследования кинетических процессов, происходящих в активной среде импульсного ЭИ СО лазера, действующего на высоких ( $V > 15$ ) колебательно-вращательных переходах молекулы СО могут быть использованы для оптимизации работы быстропротекающих (в т. ч. сверхзвуковых) СО лазеров на оберточных и высоких основных переходах, позволили проверить полную кинетическую модель импульсного электроразрядного СО лазера. Кроме этого, данные результаты продемонстрировали возможность дистанционного измерения динамики температуры в газовых средах, содержащих окись углерода и возбуждаемых

импульсным разрядом, а также возможность генерации СО лазера на смесях с большим (до 90%) содержанием кислорода в том числе на смеси СО:воздух.

**Апробация результатов работы.** Материалы, включенные в диссертацию, докладывались на 32 конференциях, 20 из которых международные, в том числе на таких конференциях как:

- XI Int. “Symp. on Gas Flow and Chemical Laser and High Power Laser Conf”, 25-30 Aug 1996, Edinburgh, UK.
- XVI Int. Conf. Coherent and Nonlinear Optics, Moscow, Russia, 29 June - 3 July, 1998.
- Int. Conf. “LASERS 2000”, 4-8 Dec. 2000, Albuquerque, NM, USA.
- IV Symp. on High Power Laser Ablation”, " 22-26 Apr. 2002, Taos, NM, USA
- Photonics West 2004: Gas and Chemical Lasers, and Applications III, 24 – 29 January 2004, San Jose, California, USA.
- XV Int. Symp. Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Laser Conf., 30 Aug – 3 Sept 2004, Prague, Czech Republic, 2004.
- Atomic and Molecular Pulsed Lasers VI, 12 - 16 September 2005, Tomsk, Russia.
- XII Conference on Laser Optics, 26 - 30 June 2006, St. Petersburg, Russia,
- Int. Conf. Coherent and Nonlinear Optics & Int. Conf. on Lasers, Applications, and Technologies, May 28- June 1, 2007, Minsk, Belarus.

**Публикации.** Основные результаты диссертации были опубликованы в работах [1\*-15\*].

**Вклад автора.** Все излагаемые в данной работе экспериментальные результаты получены лично автором или при непосредственном участии автора.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из Введения, пяти Глав, Заключение, Приложения и списка литературы. Общий объем работы - 146 страниц, 102 рисунка, 5 таблиц, библиография - 231 наименование.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **Введении** кратко обсуждаются кинетические процессы, происходящие в активной среде СО лазера, экспериментальные и теоретические исследования генерационных характеристик лазера, действующего на колебательных переходах молекулы СО. Представлено обоснование актуальности темы исследования, сформулированы цель работы и защищаемые положения.

В **Главе 1** представлен обзор экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию кинетических процессов, происходящих в АС электроразрядных СО лазеров. Исследованию генерационных характеристик

электроразрядных СО лазеров посвящено очень большое количество работ, опубликованных как у нас в стране, так и за рубежом. В предлагаемом обзоре проанализированы те работы, в которых в той или иной степени затрагиваются аспекты сравнения теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных характеристик электроразрядных СО лазеров, прежде всего с криогенным охлаждением и с накачкой ЭИ разрядом. Обсуждается также роль кислорода в АС электроразрядных СО лазерах и исследования разряда в смесях с большим содержанием молекул  $O_2$ .

В **Главе 2** приводится описание двух криогенных импульсных ЭИ лазерных установок с активным объемом 2,4 литра и 18 литров, сходных по конструкции, на которых проводились эксперименты по исследованию кинетических процессов, происходящих в активных газовых смесях, содержащих молекулы СО. В большинстве описанных экспериментов длительность импульса ЭИ разряда составляла  $\sim 40$  мкс. Условия накачки активной среды лазера при криогенных температурах характеризовались величиной удельного энерговклада в единицах Дж/(л Амага) (Амага – внесистемная единица относительная плотность, численно равная количеству молей в молярном объеме). В экспериментах удельный энерговклад  $Q_{in}$  изменялся от  $\sim 20$  до  $\sim 1000$  Дж/(л Амага). Плотность лазерной смеси  $N$  могла варьироваться от 0.02 до 0.5 Амага, а температура  $T$  от  $\sim 100$  до 300 К. Система регистрации параметров лазерного излучения позволяла измерять энергию лазерного импульса, его временную форму, регистрировать спектр излучения.

Описана конструкция, созданного непрерывного криогенного СО лазера низкого давления с накачкой в разряде постоянного тока и медленной прокачкой газовой смеси, который использовался в дальнейших исследованиях как источник пробного непрерывного ИК излучения для измерения КУСС импульсного ЭИ СО лазера. Была получена частотно-селективная генерация на более чем 200 переходах молекулы СО в основной полосе от  $6 \rightarrow 5$  ( $\lambda \sim 5.0$  мкм) до  $32 \rightarrow 31$  ( $\lambda \sim 7.5$  мкм) с мощностью до 1,5 Вт.

В **Главе 3** представлены исследования степени восстановления ИН в АС ЭИ СО лазера по отношению  $R$  энергии второго импульса к энергии первого в режиме двойной МДР, с помощью разработанной автором оптической схемы, позволяющей независимо регулировать как спектральный состав лазерного излучения, так и его временные характеристики, а также сравнение результатов экспериментов с результатами теоретических расчетов, выполненных на основе моделей ОКО и МКО.

Были построены зависимости величины  $R$  от времени задержки между импульсами  $\tau_{1-2}$  для разных переходов, полученные в одинаковых условиях. Для анализа полученных результатов определялось время восстановления величины  $R$  до уровня 0.8, которое обозначалось как  $\tau_{0.8}$ . При прочих равных условиях время восстановления  $\tau_{0.8}$  росло с увеличением номера  $V$  колебательного перехода от 3.0 мкс ( $V=5$ ) до 6.3 мкс ( $V=15$ ). Данный факт можно объяснить тем, что к моменту включения добротности резонатора на нижних переходах количество колебательно возбужденных молекул значительно больше чем на верхних. Поэтому восстановление ИН на нижних переходах происходит быстрее. При прочих равных условиях время восстановления  $\tau_{0.8}$  росло с уменьшением удельного энерговклада от 1.8 мкс ( $Q_{in} = 350 \text{ Дж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{Амага}^{-1}$ ) до 4.5 мкс ( $Q_{in} = 270 \text{ Дж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{Амага}^{-1}$ ). Данный факт, как и в предыдущем случае, объясняется уменьшением количества возбужденных молекул на исследуемых колебательных уровнях к моменту включения добротности резонатора, пропорциональным уменьшению удельного энерговклада.

Было проведено сравнение экспериментальных результатов с теоретическими расчетами зависимости  $R$  от  $\tau_{1-2}$ . На рис. 1 представлены результаты расчетов по модели МКО (сплошные линии) и экспериментальные данные, отмеченные точками. Там же приведены аналогичные зависимости, рассчитанные с помощью модели ОКО (пунктир). Как видно из рис. 1, модель АС СО лазера, учитывающая МКО, описывает экспериментальные результаты значительно лучше, чем модель ОКО. Результаты исследований явились первым прямым экспериментальным подтверждением модели МКО.

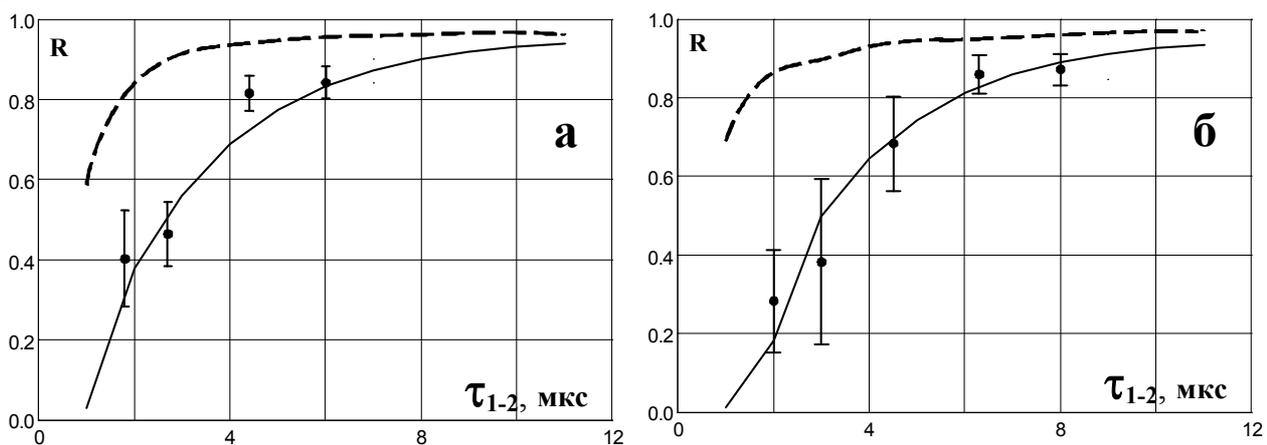


Рис. 1. Степень восстановления энергии  $R$  от времени задержки  $\tau_{1-2}$ , теория МКО (сплошная линия), теория ОКО (пунктирная линия) и эксперимент (точки):  
**а** - переход  $15 \rightarrow 14P(13)$ ,  $Q_{in}=330 \text{ Дж}/(\text{л}\cdot\text{Амага})$ ;  
**б** - переход  $19 \rightarrow 18P(15)$ ,  $Q_{in}=330 \text{ Дж}/(\text{л}\cdot\text{Амага})$ ;

В Главе 4 описаны результаты исследования динамики КУСС на высоких основных и оберточных переходах молекулы СО при импульсной ЭИ накачке газовых смесей, а также результаты исследования генерация импульсного ЭИ СО лазера на газовых смесях с большим содержанием кислорода.

#### *Динамика КУСС оберточных переходов, измеренная методом ИВП*

Метод ИВП основан на том, что генерация излучения внутри лазерного резонатора возникает в условиях превышения усиления в АС лазера над оптическими потерями резонатора за один полный обход его излучением. В эксперименте измерялось время задержки  $\tau_d$  между началом импульса накачки и началом импульса генерации для различных величин внутрирезонаторных оптических потерь. Данное время соответствовало моменту, когда в АС на выбранном переходе КУСС достигал значения полных потерь резонатора, измеренных для всех его элементов. Увеличение полных потерь резонатора удлиняло время  $\tau_d$ . Далее строился график зависимости КУСС от времени  $\tau_d$ .

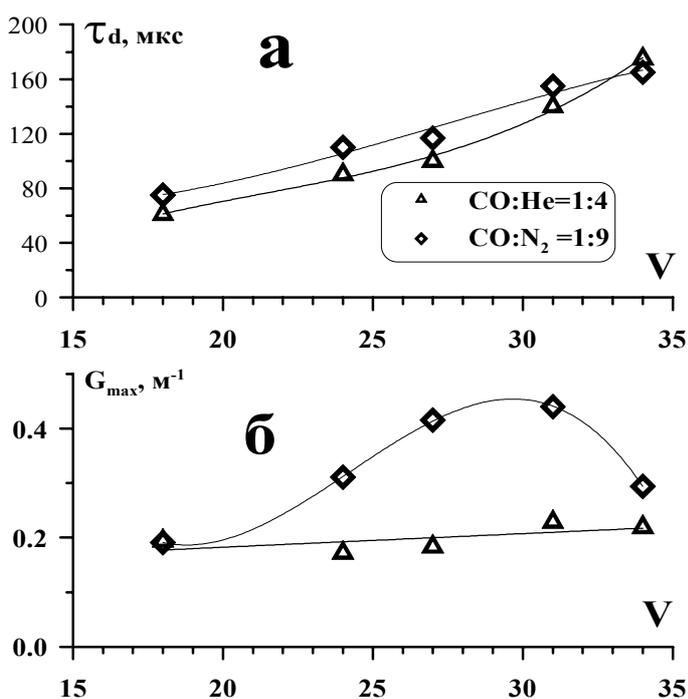


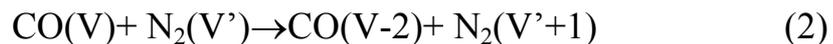
Рис. 2. Зависимости времени задержки  $\tau_d$  (а) и максимального значения КУСС  $G_{max}$  (б) от колебательного номера  $V$  перехода  $V+2 \rightarrow V$ .

На этом и последующих рисунках, если не указана ошибка измерения, то она укладывается в размер маркера

$V$  и составляла  $(0.20 \pm 0.05) \text{ м}^{-1}$  в исследованном диапазоне колебательных номеров оберточных переходов  $18 \div 36$ . Для смеси  $\text{CO:N}_2$  зависимость величины

На рис. 2а представлены зависимости временной задержки  $\tau_d$  от колебательного номера  $V$  оберточного перехода ( $V+2 \rightarrow V$ ) для лазерных смесей  $\text{CO:He}=1:4$  и  $\text{CO:N}_2=1:9$ , измеренные в условиях минимальных потерь резонатора. Обе зависимости ведут себя практически одинаково, что свидетельствует о слабом влиянии состава лазерной смеси на временные характеристики нарастания КУСС. На рис. 2б приведена зависимость величины максимального значения КУСС  $G_{max}$  от номера колебательного перехода для этих двух лазерных смесей. Для смеси газов  $\text{CO:He}$ , величина  $G_{max}$  почти не зависела от

$G_{\max}$  от  $V$  имела иной вид. При увеличении номера перехода величина  $G_{\max}$  сначала возрастала от  $0.18 \text{ м}^{-1}$  (переход  $20 \rightarrow 18 \text{ P}(12)$ ) до  $0.43 \text{ м}^{-1}$  (переход  $33 \rightarrow 31 \text{ P}(12)$ ). Дальнейшее увеличение номера перехода приводило к резкому уменьшению величины максимального значения КУСС. Это связано, по-видимому, с достаточно резким падением функции распределения молекул CO по колебательным уровням для  $V \geq 35$ . Данный факт подтверждает существование квазирезонансного несимметричного  $VV'$  обмена между высоковозбужденными ( $V \sim 40$ ) молекулами CO и азотом ( $V' \geq 0$ ):



Механизм влияния данного процесса на населенности высоких уровней молекул CO, а, следовательно и на КУСС, заключается в следующем. В смесях с  $[\text{N}_2] \gg [\text{CO}]$  значительная часть потока колебательных энергии вверх по уровням молекул CO перехватывается молекулами  $\text{N}_2$ , находящимися на низких колебательных уровнях. Из-за этого населенности колебательных уровней молекул CO с  $V \geq 40$  значительно уменьшаются. Несмотря на то, что данный процесс носит явно выраженный резонансный характер, обеднение уровней молекул CO наблюдается и для  $V = 35 \div 39$ , что можно объяснить влиянием уже  $VV$  обмена между самими молекулами CO. При этом «свалившиеся» вниз на несколько уровней от резонанса молекулы CO увеличивают населенности на уровнях с  $V = 24 \div 34$ , чем объясняется увеличение величины  $G_{\max}$  на обертоновых переходах с данными колебательными номерами.

Сравнение результатов расчетов динамики КУСС, учитывающих МКО, с экспериментальными данными было осуществлено для высоких обертоновых переходов. При расчетах динамики КУСС были использованы параметры АС и лазерного резонатора, соответствующие условиям экспериментов. На рис. 3 показаны расчетные зависимости и экспериментальные значения КУСС, показанные точками. Как видно из рис. 3, между расчетными и экспериментальными данными имеется хорошее согласие в части максимальных значений КУСС, но в то же время остаются заметные различия во временных параметрах динамики КУСС, которые возрастают при увеличении колебательного квантового числа  $V$ .

Было установлено, что результаты расчетов динамики КУСС весьма чувствительны к значениям удельного энерговклада (УЭ). Данное обстоятельство затрудняет сопоставление теории с экспериментом, т. к. нам известны лишь усредненные по объёму АС значения УЭ  $Q_{\text{in}}$  (эти значения не являются локальными величинами). Локальные значения УЭ могут отличаться

от среднего значения, что вызвано пространственной неоднородностью ионизации газа АС электронным пучком [35]. Использованный метод ИВП

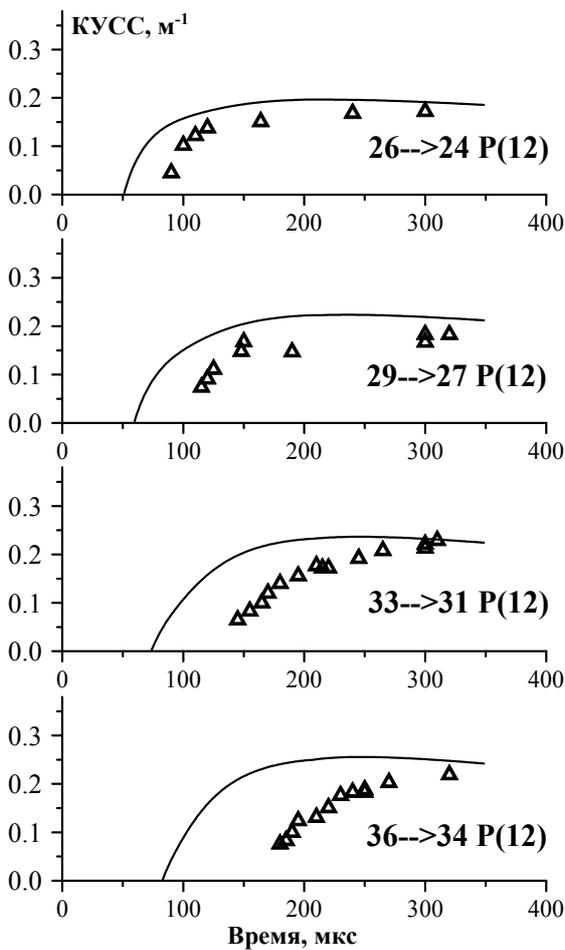


Рис. 3. Динамика КУСС на высоких обертоновых переходах, определенная экспериментально (маркеры) и рассчитанная теоретически.  $\text{CO}:\text{He}=1:4$

теоретической временной зависимостью КУСС при трёх различных значениях УЭ. Эксперимент удовлетворительно согласуется с теорией при значении локального УЭ  $Q_{\text{loc}}=94$  Дж/(л Амага), которое на 37% меньше чем  $Q_{\text{in}}$ . Использование в расчете локальных значений, а не средних значений УЭ, позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные по динамике КУСС в широком диапазоне колебательных переходов и при различной плотности активной среды для смеси  $\text{CO}:\text{He}=1:4$ . Такая корректировка УЭ для сравнения экспериментальных и теоретических временных зависимостей КУСС правомерна, т. к. в широкоапертурных ЭИ усилителях реальный объем, охватываемый ЭИ разрядом может быть больше геометрического объема, заключенного между электродами.

в реализованном варианте позволяет измерять только фронт нарастания КУСС. Для детальных сопоставлений требуются более точные измерения временной зависимости КУСС во всем диапазоне существования ИН (несколько миллисекунд), а также на временном интервале сразу после начала импульса накачки, когда наблюдается поглощение. Для этого необходимо применять метод просвечивания излучением селективного непрерывного СО лазера

#### *Динамика КУСС на основных переходах*

Последующие измерения КУСС импульсного ЭИ СО лазера, проводились с помощью специально созданного селективного непрерывного криогенного СО лазера на основных переходах молекулы СО от  $6\rightarrow 5$  до  $32\rightarrow 31$ . На рис. 4 представлен пример временной зависимости КУСС, измеренной для перехода  $21\rightarrow 20$  P(14) при значении  $Q_{\text{in}}=150$  (Дж/л Амага) в сравнении с

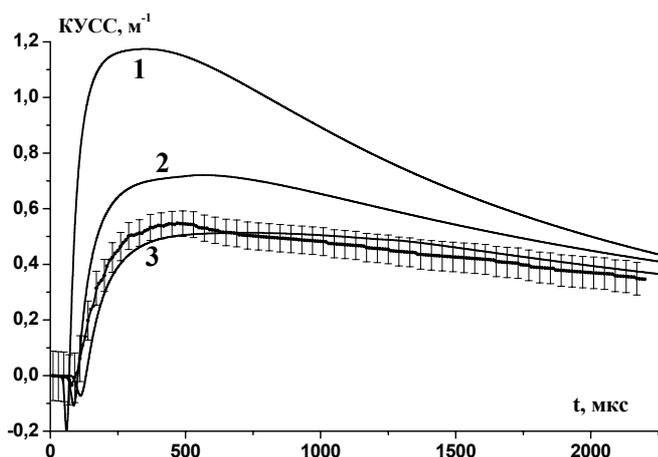


Рис. 4. Динамика КУСС на переходе 21→20 P(14) в смеси CO:He=1:4. Плотность  $N=0.12$  Амага, начальная температура  $T=120$  К. Зависимости 1, 2, 3 получены в расчете при значениях энерговклада  $Q_{loc} = 150, 110$  и  $94$  Дж/л Амага. Экспериментальная зависимость КУСС приведена при среднем значении  $Q_{in}=150$  Дж/(л Амага).

Полученное для смеси CO:N<sub>2</sub> разумное согласие теории с экспериментом имеет место при меньшей коррекции УЭ, чем в смеси CO:He. Значение локального УЭ  $Q_{loc}=180$  Дж/л Амага, найденное в результате этих расчетов, меньше величины  $Q_{in}$  на 28%.

### *Динамика КУСС в кислородосодержащих смесях*

Детальное исследование ЭИ разряда в смесях с большим (до 90%) содержанием кислорода показало, что небольшие добавки молекул CO в кислородосодержащие смеси позволяют, во-первых, многократно повысить УЭ, во-вторых, получить увеличение КУСС и, в-третьих, определить динамику температуры и населенности колебательных уровней молекул CO в таких смесях с помощью методики многочастотного лазерного зондирования.

Небольшие добавки молекул CO, H<sub>2</sub> или D<sub>2</sub> в чистый или в разбавленный благородным газом кислород позволили существенно повысить устойчивость ЭИ разряда и достичь высокой величины УЭ при большом объеме возбуждения (~18 литров). Наибольшее значение УЭ в пересчете на молекулярные компоненты смеси (~6.5 кДж л<sup>-1</sup> атм<sup>-1</sup>) было экспериментально получено для газовой смеси O<sub>2</sub>:Ar:CO=1:1:0.1 при полном давлении газа 30 Тор.

На низких колебательно-вращательных переходах (7→6 P(14), 10→9 P(15) и 14→13 P(14)) при добавлении кислорода КУСС многократно увеличивается. Этот факт проиллюстрирован на примере перехода 10→9 P(15) при пяти значениях X для смеси CO:He:O<sub>2</sub>=1:4:X (рис. 5). Наблюдаемое изменение динамики КУСС при добавлении кислорода связано, по-видимому, с процессом межмолекулярного колебательного обмена между молекулами CO и O<sub>2</sub>:



где  $\Delta E_{VJ}$  – разность по энергии квантов колебательно-вращательных переходов молекул, участвующих в обмене. Скорость обмена (3) возрастает при

увеличении колебательного числа  $V$ , т. к. энергия кванта колебательно-вращательных переходов молекулы CO при  $V \sim 20$  сравнивается с энергией кванта молекулы O<sub>2</sub> в полосе колебательного перехода  $0 \rightarrow 1$ , равной  $1556 \text{ см}^{-1}$ .

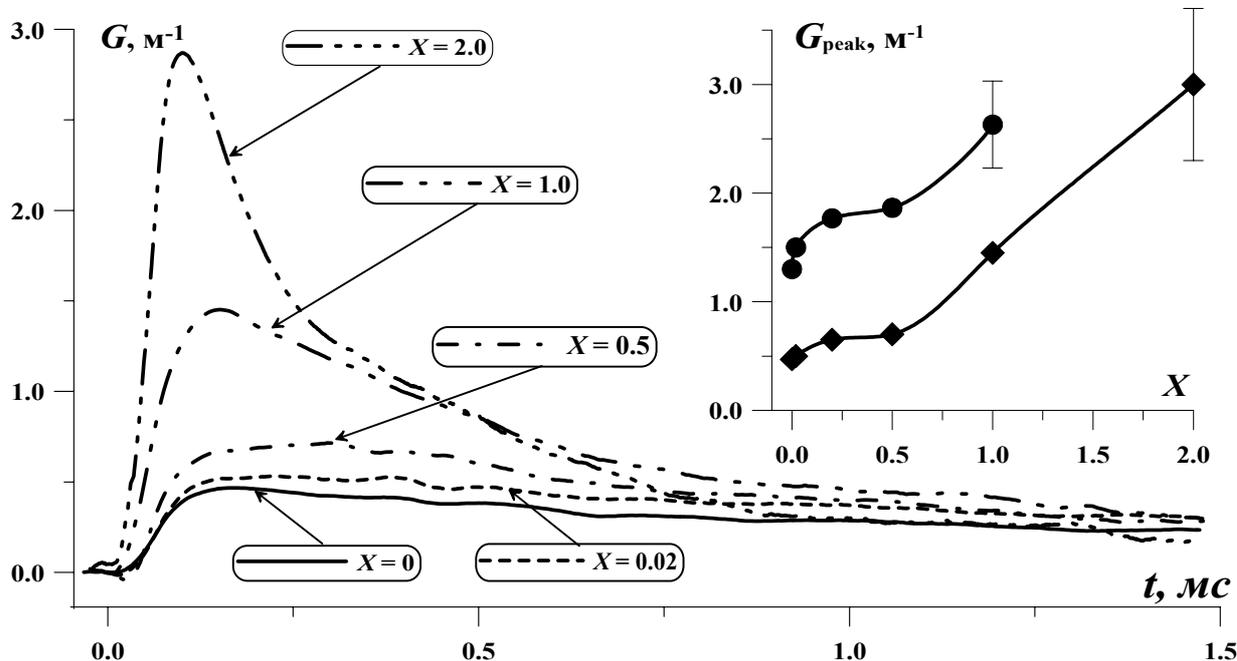


Рис. 5. Динамика КУСС на переходе  $10 \rightarrow 9 \text{ P}(15)$  для смеси CO:He:O<sub>2</sub>=1:4:X при пяти значениях  $X$ ,  $Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж}/(\text{л} \cdot \text{Амага})$ . На врезке представлена зависимость максимума КУСС  $G_{\text{peak}}$  от доли кислорода  $X$  для  $Q_{\text{in}}=240 \text{ Дж}/(\text{л} \cdot \text{Амага})$  (•) и  $Q_{\text{in}}=130 \text{ Дж}/(\text{л} \cdot \text{Амага})$  (♦).

Механизм увеличения КУСС на переходах с более низких уровней по отношению к резонансным для обмена (3), по-видимому, тот же, что и для процесса (2). При этом в кислородосодержащей смеси КФР молекул CO релаксирует быстрее чем в бескислородной смеси, и происходит это, скорее всего, за счет передачи колебательной энергии через высокие колебательные уровни молекул CO молекулам кислорода.

### *Импульсный ЭИ СО лазер на кислородосодержащих смесях*

Энергетические и временные характеристики излучения импульсного ЭИ СО лазера исследовались для смеси CO:He:O<sub>2</sub> = 1:4:X при  $X$  от 0 до 4. Выходные окна ЭИ разрядной камеры, изготовленные из CaF<sub>2</sub>, устанавливались под углом Брюстера к оси лазерного резонатора, причем ось была позиционирована в центре межэлектродного промежутка. Лазерный резонатор длиной 3 м был образован глухим сферическим зеркалом с радиусом кривизны 10 м и плоским выходным зеркалом с коэффициентом отражения 50% в диапазоне длин волн  $\lambda$  от 5

до 6 мкм. Апертура выходного излучения была ограничена диафрагмой диаметром 30 мм, установленной вблизи выходного зеркала.

При добавлении кислорода сокращались временные параметры импульса лазерного излучения. При увеличении содержания кислорода  $X$  длительность импульса излучения, измеренная на половине высоты, сокращалась в шесть раз от 120 мкс для исходной смеси до 20 мкс для  $X=4$ . При этом временная задержка между началом импульса накачки и началом импульса лазерного излучения уменьшалась от 30 мкс до 20 мкс, соответственно.

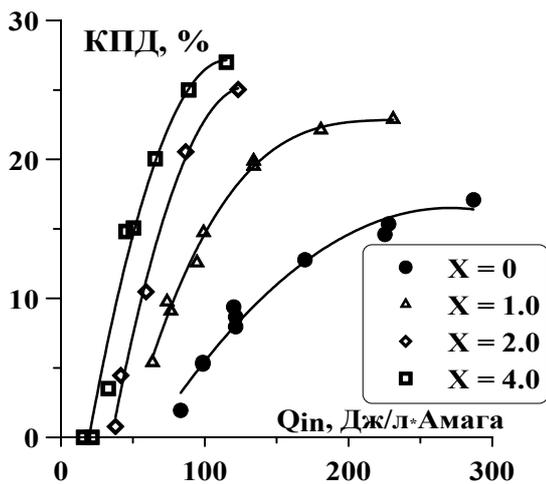


Рис. 6. Зависимость КПД импульсного ЭИ СО лазера от  $Q_{in}$  для смесей с различной долей кислорода  $X$  в газовой смеси  $CO:He:O_2=1:4:X$ .

На Рис. 6 представлены значения КПД лазера в зависимости от величины удельного энерговклада  $Q_{in}$  при различном содержании кислорода  $X$  в смеси. Отметим, что при увеличении  $X$  сокращалось значение порогового энерговклада, при превышении которого начиналась генерация излучения. С увеличением содержания кислорода  $X$  КПД лазера возрастал и достигал максимального значения при меньшей величине удельного энерговклада. Например, в исходной смеси максимальный КПД=17% достигался при  $Q_{in}=290$  Дж/(л Амага), а в смеси с долей

кислорода  $X=4$  максимальный КПД=27% - при  $Q_{in}=115$  Дж/(л Амага). Однако, необходимо отметить, что при увеличении  $X$  в газовой смеси  $CO:He:O_2=1:4:X$  уменьшается максимальный удельный энерговклад с  $Q_{in}=290$  Дж/(л Амага) для  $X=0$  до  $Q_{in}=115$  Дж/(л Амага) при  $X=4$ . С целью стабилизации разряда при больших удельных энерговкладах вместо гелия можно использовать аргон. Была продемонстрирована генерация лазерного излучения на переходах СО в газовой смеси с большим содержанием кислорода при замене гелия на аргон. Удельный энергосъем вдвое превышал удельный энергосъем в азотной смеси и составил  $52 \text{ Дж л}^{-1} \text{ Амага}^{-1}$ . Спектр излучения лазера с такой смесью газов располагался в диапазоне длин волн от 4.95 до 5.42 мкм и состоял из  $\sim 30$  колебательно-вращательных переходов молекулы СО с номерами от  $V=3$  до  $V=10$ .

На рис. 7 представлена зависимость КПД лазера от величины удельного энерговклада  $Q_{in}$  для двух газовых смесей  $CO:O_2:Ar=1:10:10$  и  $CO:N_2:Ar=1:10:10$ . КПД преобразования вложенной энергии в лазерное излучение характеризует соотношение между локальными значениями энергосъема и энерговклада.

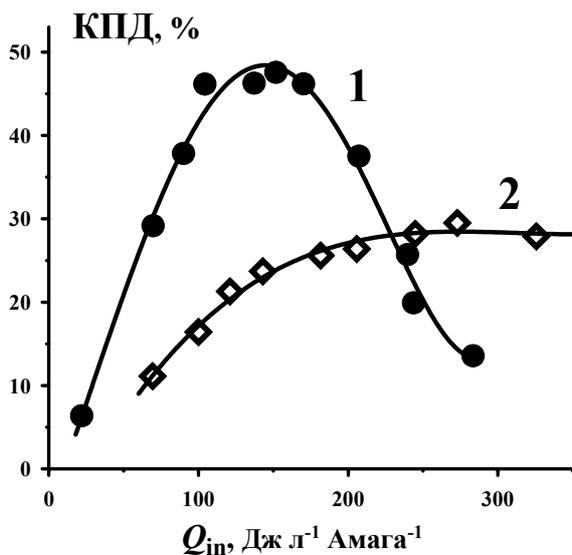


Рис. 7. КПД ЭИ СО лазера в зависимости от значения УЭ  $Q_{in}$  в смесях

1)  $CO:O_2:Ar=1:10:10$  и

2)  $CO:N_2:Ar=1:10:10$ .

$N_g = 0.08$  Амага,  $T_0=100$  К.

лазере (30%) на смеси  $CO:N_2:Ar$ , причем соотношение между значениями КПД лазера достигало 2.5 при  $Q_{in} = 100$  Дж л<sup>-1</sup> Амага<sup>-1</sup>. Уменьшение КПД СО лазера на смеси  $CO:O_2:Ar$  при значениях  $Q_{in} > 170$  Дж л<sup>-1</sup> Амага<sup>-1</sup> может быть связано как с нагревом газа, так и с возбуждением электронных состояний молекулярного кислорода [8\*].

### **Моделирование динамики КУСС для сверхзвукового СО лазера**

В экспериментах по исследованию динамики КУСС были промоделированы условия (температура, удельный энерговклад, давление, состав смеси), характерные для сверхзвукового СО лазера с ВЧ накачкой [10\*]. Они показали, в-частности, что надежную генерацию в сверхзвуковом СО лазере на переходах 19→18 и выше, соответствующих окну прозрачности атмосферы, можно получить увеличив давление АС в сверхзвуковом потоке как минимум втрое (до ~30 Торр) при удельном энерговкладе  $200 \div 250$  Дж·(л·Амага)<sup>-1</sup>. В этом случае время достижения максимума КУСС составит ~200 мкс и окажется меньше времени пролета частиц АС от разрядной области до резонатора.

В **Главе 5** представлены экспериментальные результаты по определению динамики температуры и населенностей колебательных уровней молекул СО, полученные благодаря усовершенствованию метода многочастотного лазерного зондирования применительно к импульсному ЭИ СО лазерному усилителю, работающему на смесях  $CO:He$ ,  $CO:N_2$  и  $CO:O_2$ .

Однако измерение локального значения УЭ  $Q_{loc}$  в плазме импульсного разряда представляет собой весьма трудную экспериментальную задачу. Как было показано выше на основе сопоставления расчетных и экспериментальных данных по динамике КУСС соотношение между локальным и средним значением УЭ  $Q_{loc}/Q_{in}$  может изменяться от 0.63 до 0.72 в зависимости от условий возбуждения молекул. В этом случае значение КПД СО лазера ( $КПД = Q_{las}/Q_{loc} 100\%$ ) на смеси  $CO:O_2:Ar$  составляло 47% (рис. 7) от вложенной энергии и в 1.6 раза превышало КПД в СО

Восстановление температуры газа методом многочастотного лазерного зондирования представляет собой поиск такой теоретической кривой, которая является наилучшей для описания величин КУСС  $G$  в зависимости от вращательного числа  $J$ , измеряемых с определенной погрешностью.

В результате проведенного анализа для исследования динамики температуры были выбраны десять спектральных линий из трех последовательных колебательных полос:  $13 \rightarrow 12$   $P(J=9, 13, 15)$ ;  $14 \rightarrow 13$   $P(8, 10, 13, 14)$ ;  $15 \rightarrow 14$   $P(10, 14, 16)$ .

На Рис. 8 представлены результаты восстановления температуры газа кислородной  $\text{CO}:\text{O}_2=1:19$  смеси и, для сравнения, - в гелиевой  $\text{CO}:\text{He}=1:4$  смеси.

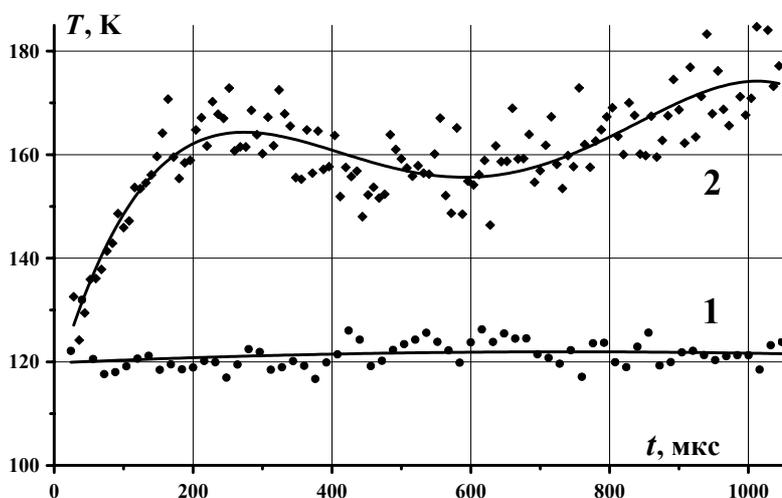


Рис. 9. Динамика температуры газа в активной среде ЭИ СО лазера для газовых смесей:

1).  $\text{CO}:\text{He}=1:4$ ,  $N=0.12$  Амага,  $Q_{\text{in}}=100$  Дж (л Амага) $^{-1}$ ,  $T_0 \approx 110$  К.

2).  $\text{CO}:\text{O}_2=1:19$ ,  $N=0.06$  Амага,  $Q_{\text{in}}=130$  Дж (л Амага) $^{-1}$ ,  $T_0 \approx 120$  К.

Точками показаны результаты статистического анализа точности восстановления температуры.

В гелиевой смеси температура возросла к 50-й микросекунде примерно на 10 К (локальное значение начальной температуры газа  $T_0 \approx 110$  К) и далее оставалась практически постоянной. В кислородной смеси к моменту времени  $t=300$  мкс она возросла на 45 К ( $T_0 \approx 120$  К). Среднестатистическая погрешность восстановления температуры газа в гелиевой смеси составляла  $\pm 7$  К, а в кислородной смеси  $\pm 10$  К. Изменение плотности газа при его расширении в буферный объем после разряда проявилось в виде уменьшения температуры газа для кислородной смеси (Рис. 9) на интервале времени от 300 до 800 мкс.

После отработки описанной выше методики была определена динамика температуры газа в смеси  $\text{CO}:\text{O}_2=1:19$  при начальной температуре  $T \approx 290$  К. Температура газа возросла от начального значения до  $415 \pm 20$  К за первые двести микросекунд.

Кроме температуры, метод многочастотного лазерного зондирования позволяет восстанавливать населенность колебательных уровней молекул СО [30, 31]. Эти эксперименты проводились с целью выяснения причины увеличения максимального значения КУСС  $G_{\text{peak}}$  на низких колебательных

переходах в кислородосодержащих смесях. Для газовой смеси  $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$  повышение содержания кислорода  $X$  от 0 до 2 приводило к тому, что  $G_{\text{peak}}$  для всех трёх переходов полосы  $10 \rightarrow 9$  с  $J = 7, 10$  и  $15$  увеличивалось в 1.4, 2.2 и 4 раза, соответственно.

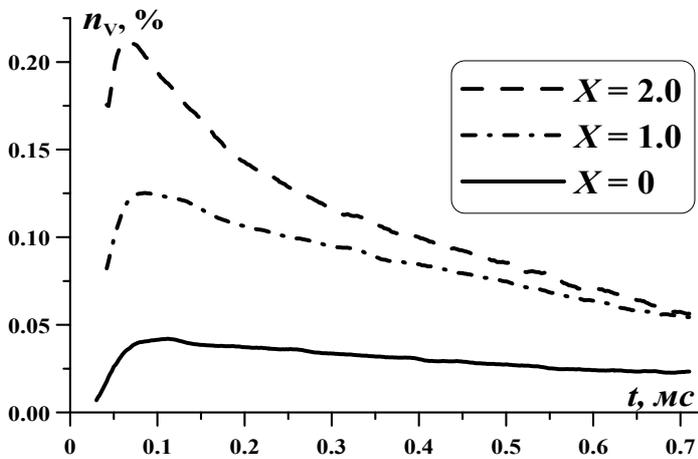


Рис. 10. Временная динамика относительной населенности  $n_V=N_V/N_{\text{CO}}$  колебательного уровня  $V=9$  в смеси  $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2=1:4:X$  для трех значений  $X=0, 1$  и  $2$  при удельном энергокладе  $Q_{\text{in}}=130$  Дж/(л Амага),  $T_0 \approx 130$  К.

Было обнаружено, что этот рост  $G_{\text{peak}}$  связан с увеличением населенности соответствующих колебательных уровней. Например, для колебательного уровня  $V=9$  пиковое значение относительной населенности  $n_V$  возрастало почти в пять раз при увеличении  $X$  от 0 до 2 (Рис. 10). Теоретические оценки показали, что при фиксированной КФР только из-за нагрева рабочей смеси от  $T_g=140$  К до  $T_g=200$  К значение КУСС на переходе  $10 \rightarrow 9 P(15)$ , может увеличиться в

1.9 раза, но значения КУСС для  $J=7$  и  $10$  при тех же условиях должны были уменьшаться. Поэтому увеличение  $G_{\text{peak}}$  на низких колебательных переходах при добавлении кислорода в рабочую смесь слабо связано с нагревом газа.

В **Заключении** сформулированы основные выводы диссертации.

1. Выполнены исследования времени восстановления ИН, которое характеризует кинетику колебательного обмена высоковозбужденных молекул  $\text{CO}$  с помощью измерения отношения  $R$  энергий второго и первого лазерных импульсов генерации селективного ЭИ  $\text{CO}$  лазера с двукратной МДР. Время восстановления ИН на колебательных переходах основной полосы от  $5 \rightarrow 4$  до  $33 \rightarrow 32$  составляют  $\sim 1.8 \div 6.3$  мкс, в зависимости от экспериментальных условий. Увеличение удельного энергоклада приводит к уменьшению времени восстановления ИН. Произведено сравнение экспериментальных значений величины  $R$ , полученных для селективной генерации на нескольких колебательно-вращательных переходах молекулы  $\text{CO}$  от номеров  $V=13$  до  $V=20$  со значениями  $R$ , рассчитанными на основе моделей МКО и ОКО. Показано, что только модель МКО позволяет адекватно описать результаты проведенного эксперимента. Результаты исследования явились первым прямым экспериментальным подтверждением модели МКО.

2. Передний фронт нарастания КУСС на отдельных обертоновых колебательно-вращательных переходах импульсного ЭИ СО лазера был измерен методом ИВП. В смеси СО:Не=1:4 максимальное значение КУСС практически не зависит от номера перехода  $V$ , составляя  $0.20 \pm 0.05 \text{ м}^{-1}$ . Максимальное значение КУСС для смеси СО:N<sub>2</sub>=1:4, N=0.12 Амага сначала увеличивается с ростом  $V$  от  $0.18 \text{ м}^{-1}$  (переход 20→18 P(12)) до  $0.43 \text{ м}^{-1}$  (переход 33→31 P(12)), а затем резко снижается до  $\sim 0.1 \text{ м}^{-1}$  (переход 38→36 P(12)). Данный факт подтверждает существование несимметричного VV'-обмена между N<sub>2</sub> и СО.

3. Был создан непрерывный криогенный СО лазер низкого давления с накачкой в РПТ и медленной прокачкой активной газовой смеси. В неселективном режиме лазер позволял получить мощность генерации на основных переходах  $\sim 30 \text{ Вт}$  при КПД  $\sim 21\%$ . Осуществлена частотно-селективная генерация на более 200 переходах молекулы СО в основной полосе от 6→5 ( $\lambda \sim 5.0 \text{ мкм}$ ) до 32→31 ( $\lambda \sim 7.5 \text{ мкм}$ ) с мощностью до 1,5 Вт. Была получена неселективная генерация на обертоновых переходах молекулы СО с мощностью до  $\sim 450 \text{ мВт}$  при КПД  $\sim 1\%$ . Также наблюдалась селективная генерация на семи колебательно-вращательных переходах: 32→30 P (9,10); 33→31 P (9,10,11); 34→32 P (9,10) ( $\lambda \sim 3.7\text{-}3.8 \text{ мкм}$ ) с мощностью до 1 мВт.

4. Проведено исследование динамики КУСС импульсного ЭИ СО лазерного усилителя для колебательно-вращательных переходов основной полосы от 8→7 ( $\lambda \sim 5.2 \text{ мкм}$ ) до 32→31 ( $\sim 7.5 \text{ мкм}$ ) при различных параметрах активной среды с помощью непрерывного селективного СО лазера. Наибольшее измеренное значение КУСС составило  $\sim 3.3 \text{ м}^{-1}$  (переход 8→7 P(10),  $Q_{in}=250 \text{ Дж} \cdot (\text{л} \cdot \text{Амага})^{-1}$ , смесь СО:Не=1:4, N=0.12 Амага,  $\tau_3 \sim 60 \text{ мкс}$ ). Для наиболее высокого из исследованных колебательно-вращательных переходов максимум КУСС составил:  $\sim 1.0 \text{ м}^{-1}$  (переход 32→31 P(9)  $Q_{in}=250 \text{ Дж} \cdot (\text{л} \cdot \text{Амага})^{-1}$ , смесь СО:Не=1:4, N=0.12 Амага,  $\tau_3 \sim 430 \text{ мкс}$ ). Использование газовой смеси СО:N<sub>2</sub>=1:9 в импульсном ЭИ СО лазерном усилителе, несмотря на увеличение удельного энерговклада до  $\sim 1000 \text{ Дж} \cdot (\text{л} \cdot \text{Амага})^{-1}$ , не приводит к увеличению максимального значения КУСС, а лишь увеличивает время его достижение  $\tau_3$  и время существования ИН в смеси ( $\tau_3$  возрастало почти в 2 раза по сравнению со смесью СО:Не=1:4 при энерговкладе  $Q_{in} \sim 250\text{-}300 \text{ Дж} \cdot (\text{л} \cdot \text{Амага})^{-1}$ ).

5. Сравнение экспериментально полученных временных зависимостей КУСС для высоких основных и обертоновых переходов с результатами расчетов, выполненных на основе модели МКО, подтверждает необходимость

использования этой модели в теории электроразрядного СО лазера. На основе данного сравнения произведена оценка локального удельного энерговклада в газовой смеси ЭИ лазерного СО усилителя.

6. Результаты экспериментального исследования ЭИ разряда в кислороде продемонстрировали, что молекулярные добавки (СО или Н<sub>2</sub>) в чистый или в разбавленный благородным газом кислород позволяют существенно повысить устойчивость ЭИ разряда и достичь высокой величины удельного энерговклада при большом объеме возбуждения (~18 литров). Наибольшее значение удельного энерговклада в пересчете на молекулярные компоненты смеси (~6.5 кДж л<sup>-1</sup> атм<sup>-1</sup>) было экспериментально получено для газовой смеси О<sub>2</sub>:Аг:СО=1:1:0.1 при полном давлении газа 30 Тор.

7. При увеличении доли кислорода X (смесь СО:Не:О<sub>2</sub>=1:4:X) возрастал максимум КУСС G<sub>max</sub> на низких (V<15) основных переходах. Причем на переходе 10→9 Р(15) при X=2.0 значение G<sub>max</sub> было в 6 раз больше, чем для смеси без кислорода (X=0). Время существования инверсной населенности при увеличении X сокращалось. Наблюдаемое изменение динамики КУСС при добавлении кислорода подтверждает существование процесса межмолекулярного колебательного обмена между молекулами СО и О<sub>2</sub>. При удельном энергокладе ~ 170 Дж/(л·Амага) для кислородосодержащей газовой смеси СО:О<sub>2</sub>:Аг=1:10:10 удельный энергосъем вдвое превышал удельный энергосъем в азотной смеси и составил 52 Дж л<sup>-1</sup> Амага<sup>-1</sup> при КПД 47±1%.

8. Применительно к задаче исследования динамики температуры и населенности молекул СО импульсного ЭИ усилителя был усовершенствован метод многочастотного лазерного зондирования АС с помощью излучения непрерывного селективного СО лазера. Была улучшена точность определения температуры, составившая ±3÷5 К. Была исследована динамика температуры и населенности молекул СО в газовых смесях СО:Не, СО:Н<sub>2</sub> и СО:О<sub>2</sub> при начальной температуре Т~100 К. Для кислородной смеси СО:О<sub>2</sub>=1:20 при плотности газовой смеси 0.04 Амага была измерена динамика температуры при начальной температуре Т~300 К, когда наблюдалось только поглощение излучения зондирующего непрерывного СО лазера на временах до 1 мс после начала импульса накачки.

В **Приложении** представлена наиболее полная теоретическая модель электроразрядного СО лазера, сформулированная на основе сравнения расчетов с экспериментальными результатами, полученными в том числе в представленной диссертационной работе.

## Список литературы

1. Алейников В.С., Масычев В.И. *Лазеры на окиси углерода*. М., Радио и связь, 1990.
2. Ионин А.А. // В кн. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы* Сер. Б, Том XI-4, под ред. Яковленко С.И., М., Физматлит, с.740, 2005.
3. Ionin A.A. // В кн. *Gas Lasers*. Ed. by M. Endo and R.F. Walter. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, p. 201, 2007.
4. Басов Н.Г., Данилычев В.А., Ионин А.А. и др. // *Квант. электрон.*, Т. 1, с. 2527, 1974.
5. Mann M.M. // *AIAA Journal*, V. 14, No. 5, p. 549. 1976.
6. Dymshits B.M., Ivanov G.V., Mescherskiy A.N., Kovsh I.B. // *Proc. SPIE*, V. 2206, p. 109, 1994.
7. Wu B., George T., Schneider M. et al. // *Appl. Phys. B*, V. 52, p. 163, 1991.
8. Yardley J.T. // *J.Molec.Spectr.*, 35, 2, p.314, 1970.
9. Bergman R.C., Rich J.W. // *Appl. Phys. Lett.* 31, p. 597, 1977.
10. Басов Н.Г., Данилычев В.А., Ионин А.А., Казакевич В.С. // *Квант. электрон.*, 5, №8, с. 1855, 1978.
11. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. // *Квант.Электрон.*, 30, с. 771, 2000.
12. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. // *Квант. Электрон.*, 30, с. 859, 2000.
13. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А., и др. // *Препринт ФИАН*. № 17, 2000.
14. Межерис Р., *Лазерное дистанционное зондирование*, М. Мир, 1987.
15. Бузыкин О.Г., Иванов С.В., Ионин А.А. и др. // *Опт. Атмосферы и Океана*, Т. 14, №5, с. 400, 2001.
16. Бузыкин О.Г., Иванов С.В., Ионин А.А. и др. // *Изв. Академии наук. Сер. физ.*, Т. 66, № 7, с. 962, 2002.
17. Гордиец Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. // *ЖЭТФ*, Т.60, Вып.1, с. 102, 1971.
18. Dillon T.A., Stephenson J.C. // *Phys. Rev. A.*, V. 6, p. 1460, 1972.
19. Биллинг Г.Д. // В кн. *Неравновесная колебательная кинетика*. Под ред. М. Капителли, М.: Мир., с. 104, 1989.
20. Конев Ю.Б., Кочетов И.В., Курносков А.К., Мирзакаримов Б.А. // *Квант. электрон.*, Т. 21, Вып.2, с. 133, 1994.
21. Klosterman E.L., Byron S.R. // *J. Appl. Phys.* V. 50, №8, p. 5168, 1979.
22. Горшков И.И., Ионин А.А., Котков А.А. и др. // *КСФ*, Вып.5. с.31, 1989.
23. Головин А.С., Гурашвили В.А., Кочетов И.В. и др. // *Квант. электрон.*, Т. 23, Вып. 5, с. 405, 1996.
24. McCord J. E., Tate R. F., Dass S. et al. *Proc. SPIE*, V. 5448, p. 379, 2004.
25. Смит Н.С., Хассан Х.А. // *Ракетн. техн. и космонавтика*, Т. 14, № 3, с. 105, 1976.
26. Шарков В.Ф., Дымшиц Б.М., Григорьян Г.М. и др. // *Квант. Электрон.*, Т. 4, Вып.8, с. 1824, 1977.
27. Kodama Yu., Sato H. // *IEEE. J. Quant. Electron.*, V. QE-34, № 2, 241, 1998.
28. Patel S.K.N. // *Phys. Rev.*, V. 141, № 1, p. 71, 1966.
29. Дорош В.С., Добро Л.Ф., Иванов В.Н. и др. // *Квант. электрон.*, Т. 2, Вып. 5, с. 1030, 1975.
30. Басов Н.Г., Казакевич В.С., Ковш И.Б. Микрюков А.Н. // *Квант. электрон.*, Т. 10, с. 1049, 1983.
31. Вязовецкий Н.М., Дидюков А.И., Кирко В.Ю. и др. // *ЖПС*, Т. 52, № 4, с. 659, 1990.

32. Benard D. J., McDermott W. C., Pchelkin N. R., Bousek R. R. // *Appl. Phys. Lett.*, V. 34, № 1, p. 40, 1979.
33. Юрышев Н.Н., // *Квант. электрон.* Т. 26, № 7, с. 583, 1996.
34. Ionin A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Yuryshv N.N. // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40, No 2, p. R25, 2007.
35. Бойков Е.С., Минин В.В, Третьяков В.Э., Яценко Б.П. // *Препринт НИИЭФА*, № А-0530, Л., 1981.

**Список публикаций с участием автора, в которых содержатся  
основные результаты настоящей работы**

- 1\* Ионин А.А., Климачев Ю.М., Кобза Г., Сеницын Д.В. Импульсный частотно-селективный перестраиваемый электроионизационный СО лазер с модуляцией добротности резонатора. *Квант. электроника*. **24**, № 3, 195-200 (1997).
- 2\* Ионин А.А., Климачев Ю.М., Кобза Г., Сеницын Д.В. Лазер с перестраиваемыми спектральными и временными характеристиками. Патент РФ №2106731, приоритет 12.08.96. *Бюллетень изобретений*. № 7., 330, (1998).
- 3\* Ионин А.А., Климачев Ю.М., Конев Ю.Б., Кочетов И.В., Курносое А.К., Сеницын Д.В. Внутррезонаторное взаимодействие селективных по частоте коротких импульсов излучения СО лазера с колебательно возбужденной активной средой". *Известия РАН, сер. физ.*, **63**, № 4, 676-682 (1999).
- 4\* Ионин А.А., Климачев Ю.М., Конев Ю.Б., Курносое А.К., Напартович А.П., Сеницын Д.В., Терехов Ю.В. Многоквантовый колебательный обмен высоковозбужденных молекул окиси углерода. *Квантовая электроника*, **30**, № 7, 573-579 (2000).
- 5\* Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Konev Yu.B., Kotkov A.A., Kurnosov A.K., Napartovich A.P., Seleznev L.V., Sinitsyn D.V., Terekhov Yu.V. Theoretical modeling and experimental studies of the multi-quantum vibration exchange in vibrationally excited CO molecules. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**, 2230-2236 (2001).
- 6\* Басов Н.Г., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Котков А.А., Курносое 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 обертоне молекулы СО, действующий в спектральном диапазоне 2.5-4.2 мкм. 3. Коэффициент усиления и кинетические процессы на высоких колебательных уровнях. *Квантовая электроника*, **32**, № 5, 404-410 (2002).
- 7\* Ионин А.А., Климачев Ю.М., Котков А.А., Кочетов И.В., Напартович А.П., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Хагер Г.Д. Способ получения синглетного кислорода в плазме несамостоятельного электрического разряда, Патент РФ №2206495, *Бюллетень изобретений и полезных моделей*, № 17, 658, (2003).

- 8\* Ionin A.A., Klimachev Yu.M., Kotkov A.A., Kochetov I.V., Napartovich A.P., Sinitsyn D.V., Seleznev L.V., Hager G.D., Non-self-sustained electric discharge in oxygen gas mixtures: singlet delta oxygen production, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 982-989, (2003).
- 9\* С.В. Ветошкин, А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков, А.К. Курносов, А.П. Напартович, О.А. Рулев, Л.В. Селезнев, Д.В. Сеницын, С.Л. Шнырев, Динамика коэффициента усиления в активной среде импульсного электроионизационного СО-лазера: теория и эксперимент, *Квантовая электроника*, **35**, (12), 1107-1112 (2005).
- 10\* Бон В., Бюлов Х. фон, Дасс Ш., Ионин А.А., Климачев Ю.М., Котков А.А., Макайвер Дж.К., Маккорд Дж.Е., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В., Тейт Р.Ф., Хагер Г.Д. Мощный сверхзвуковой СО-лазер на основных и обертоновых переходах, *Квантовая электроника*, **35**, №12, 1126-1130 (2005)
- 11\* A. Ionin, Yu Klimachev, A. Kotkov, A. Kozlov, O. Rulev, L. Seleznev, D. Sinitsyn, S. Vetoshkin. Multiline Laser Probing for Active Media CO:He, CO:N<sub>2</sub>, and CO:O<sub>2</sub> in Wide-Aperture Pulsed Amplifier, *J. of Russ. Laser Research*, **27**, (1), 33-69 (2006).
- 12\* А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков, А.К. Курносов, А.П. Напартович, О.А. Рулев, Л.В. Селезнев, Д.В. Сеницын, Г. Хагер, С.Л. Шнырев, Импульсный обертоновый СО лазер с КПД 16%", *Квантовая электроника*, **36**, (12), 1153-1154 (2006).
- 13\* С.В. Ветошкин, А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков, О.А. Рулев, Л.В. Селезнев, Д.В. Сеницын, Временная динамика усиления в импульсном СО лазерном усилителе на газовых смесях СО:He, СО:N<sub>2</sub> и СО:O<sub>2</sub>, *Квантовая электроника*, **37**, (2), 111-117 (2007).
- 14\* А.А. Ионин, Ю.М. Климачев, А.Ю. Козлов, А.А. Котков, О.А. Рулев, Л.В. Селезнев, Д.В. Сеницын, Многочастотное лазерное зондирование содержащих СО газовых сред, возбужденных в импульсном разряде, *Квантовая электроника*, **37**, 231-236 (2007).
- 15\* Klimachev Yu. M., Ionin A. A., Kotkov A. A., Kozlov A. Yu., Seleznev L. V., Andrusenko R. P., Pulsed CO laser operating on gas mixtures with high oxygen content, *Proc. SPIE*, **6735**, 67350H-1 - 67350H-10 (2007).