

Импульсный электроионизационный СО-лазер на кислородсодержащих газовых смесях

А.А.Ионин, Ю.М.Климачев, А.Ю.Козлов, А.А.Котков, Л.В.Селезнев

Показано, что добавление молекулярного кислорода в рабочую смесь импульсного электроионизационного (ЭИ) лазерного СО-усилителя увеличивает коэффициент усиления слабого сигнала (КУСС) активной среды на основных колебательных переходах $v + 1 \rightarrow v$ молекулы СО для $v = 6 - 13$, что связано с увеличением населенности колебательных уровней. При этом временные параметры динамики уменьшаются на всех зондированных переходах. Для объяснения наблюдаемых изменений временной динамики КУСС используется анализ кинетических процессов колебательно-колебательного обмена между молекулами. Исследование генерационных характеристик импульсного ЭИ СО-лазера показало, что значение порогового энерговклада уменьшается при увеличении содержания кислорода в рабочей смеси. Обнаружено, что при добавлении кислорода возрастает КПД СО-лазера на основных переходах, причем максимальное значение КПД достигается при меньших значениях энерговклада. Продемонстрировано, что импульсный ЭИ СО-лазер может действовать на воздушной рабочей смеси как на основных переходах, так и на переходах первого колебательного обертона $v + 2 \rightarrow v$.

Ключевые слова: коэффициент усиления, окись углерода, кислород, колебательный обмен, импульсный разряд, СО-лазер.

1. Введение

Влияние состава рабочей смеси газов, в частности содержания молекул кислорода, на генерационные характеристики электроразрядного СО-лазера наиболее подробно исследовалось для непрерывных СО-лазеров низкого давления, накачиваемых разрядом постоянного тока. Дело в том, что мощность излучения и КПД непрерывного СО-лазера возрастают [1, 2] при добавлении в рабочую смесь СО : N₂ : He небольшого количества кислорода (при соотношении концентраций молекул $X = [O_2]/[CO] = 0.001 - 0.1$). Отчасти это связано с тем, что потенциал ионизации U_e для молекул O₂ ($U_e = 12.1$ эВ) меньше, чем для молекул СО ($U_e = 14.0$ эВ). Поэтому в кислородсодержащих смесях основным поставщиком электронов при самостоятельном разряде становятся молекулы кислорода [3], а концентрация рабочих (нейтральных) молекул СО при этом практически не уменьшается.

Вместе с тем присутствие кислорода влияет на плазмохимические процессы, происходящие в смеси при самостоятельном разряде. Например, в рабочей смеси СО : He, в которой кислород отсутствует, диссоциация молекул СО происходит настолько интенсивно, что становится трудно осуществить генерацию излучения непрерывного СО-лазера [4, 5]. Кроме того, в разряде образуются молекулы C₂, CN, C₂O, C₃O₂ и др., способные существенно изменить колебательную функцию распределения (КФР) молекул СО [6–8], снижая энергетические

характеристики лазера. Добавление кислорода в газовую смесь уменьшает концентрацию таких молекул. В работе [8] было показано, что населенность колебательных уровней N_v молекулы СО для $v = 4 - 26$ может увеличиваться в несколько раз при увеличении содержания кислорода X от 0 до ~ 0.001 . При дальнейшем увеличении X до ~ 0.1 изменение КФР происходит преимущественно для колебательных уровней $v > 20$, населенность которых только уменьшается [8]. Разнообразные механизмы, предложенные для объяснения увеличения N_v при добавлении кислорода в рабочую смесь непрерывного СО-лазера низкого давления, обсуждаются в работах [9–11].

Содержание кислорода X в рабочей смеси такого лазера обычно составляет менее 0.1, что обусловлено плазмохимическими процессами образования молекул СО₂, которые дезактивируют колебательно-возбужденные состояния молекул СО [12–15]. Образование в разряде молекул СО₂ наиболее существенно влияет на энергетические характеристики отпаянных СО-лазеров низкого давления с водяным охлаждением [16]. Поэтому для таких лазеров рабочая смесь СО : N₂ : He : Хе готовится из газов особой чистоты с содержанием примесей менее 0.001 % [16] и кислород в такую смесь не добавляется, его заменяет легкоионизируемый газ ксенон ($U_e = 12.1$ эВ). Эффективность СО-лазера значительно увеличивается при охлаждении лазерной среды жидким азотом [1], однако ксенон, имеющий высокую температуру конденсации, быстро осаждается на стенках криогенного теплообменника. Поэтому при криогенном охлаждении рабочей смеси непрерывного СО-лазера низкого давления приходится использовать кислородсодержащие смеси и обеспечивать регулярную замену или прокачку смеси, поскольку на охлаждаемой поверхности осаждается взрывоопасная [17] смесь веществ, образовавшихся в самостоятельном разряде, – озон, окислы азота и др.

А.А.Ионин, Ю.М.Климачев, А.Ю.Козлов, А.А.Котков, Л.В.Селезнев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: aion@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 23 октября 2007 г., после доработки – 6 декабря 2007 г.

В ЭИ лазерах [18, 19], в которых ионизация газа обеспечивается внешним ионизатором, можно использовать рабочие смеси при повышенном давлении газа, причем необходимость вводить в состав рабочей смеси легкоионизируемые добавки отпадает. При криогенном охлаждении активной среды ЭИ СО-лазеров образовавшиеся в разряде вещества осаждаются на поверхности теплообменника, а при сверхзвуковом охлаждении рабочей смеси [20–27] молекулы этих веществ выносятся потоком газа, поэтому в рабочую смесь таких лазеров кислород или ксенон обычно не добавляют.

Именно ЭИ СО-лазеры, действующие в режиме свободной генерации при криогенном или сверхзвуковом охлаждении активной среды, обладают наибольшей эффективностью (далее КПД) преобразования энергии накачки в энергию лазерного излучения [28–32]. У таких лазеров КПД может превышать 35 % на основных (см., напр., [24, 28, 31–33]) и 15 % на обертоновых [34–36] колебательных переходах. В селективном режиме СО-лазер может излучать на множестве (~ 1000) колебательно-вращательных переходов молекулы СО, как в полосе основных колебательных переходов ($v + 1 \rightarrow v$, длина волны λ от 4.7 до 8.3 мкм [37, 38]), так и в полосе первого колебательного обертона ($v + 2 \rightarrow v$, λ от 2.5 до 4.2 мкм [34, 35, 39]).

Исследования характеристик ЭИ разряда в смесях с большим содержанием кислорода ($X = 4 - 100$ [40–42]) проводились с целью определения концентрации синглетного кислорода, нарабатываемого в ЭИ разряде. Было обнаружено, что добавление молекул СО стабилизирует ЭИ разряд и значительно повышает удельный энерговыход. На смеси состава СО:Аг:О₂ = 1:10:10 при охлаждении ее до ~ 100 К была получена генерация излучения импульсного ЭИ СО-лазера [42, 43]. Более того, было показано, что КПД импульсного ЭИ СО-лазера на смеси с большим содержанием кислорода ($X \sim 10$) может в полтора-два раза превышать КПД лазера на обычной лазерной смеси СО: N₂: He: Аг [31]. За исключением наших работ [31, 42–46], свойства активной среды импульсных ЭИ СО-лазеров с большим содержанием кислорода ($X > 0.5$) ранее не исследовались.

Активная среда СО-лазера является многоуровневой системой, и ее характеристики связаны с неравновесными процессами заселения и дезактивации множества колебательных уровней. Основным методом исследования свойств такой многоуровневой среды заключается в изучении КУСС на колебательно-вращательных переходах молекулы СО. На основе анализа временной динамики КУСС можно судить о кинетических процессах, происходящих при обмене колебательной энергией между молекулами [31, 47, 48].

В настоящей работе проводится анализ временной динамики КУСС для широкого диапазона колебательных переходов и условий импульсной ЭИ накачки. Цель работы – выяснить, как изменяется временная динамика КУСС на колебательно-вращательных переходах молекулы СО в активной среде криогенного лазерного усилителя, накачиваемой импульсным ЭИ разрядом, при изменении содержания молекулярного кислорода в рабочей смеси. С той же целью проводилось исследование энергетических характеристик импульсного ЭИ СО-лазера, работающего как на основных переходах ($\lambda = 5 - 5.5$ мкм), так и на переходах первого колебательного обертона ($\lambda = 2.6 - 2.8$ мкм) молекулы СО при различ-

ном составе рабочей смеси СО: О₂: N₂: He, включая смесь СО: воздух.

2. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на широкоапертурной импульсной ЭИ лазерной установке, подробно описанной в [49], с длиной активной среды $L = 1.2$ м. Рабочая смесь газов СО: He: О₂ = 1:4: X или СО: N₂: О₂ = 1:9: X охлаждалась жидким азотом через боковые стенки разрядной камеры. В экспериментах использовались следующие газы: кислород особой чистоты с содержанием О₂ не менее 99.999 %, гелий очищенный с содержанием He не менее 99.99 %, азот технический с содержанием N₂ не менее 99.6 % (О₂ менее 0.4 %), оксид углерода с содержанием СО не менее 98 % (О₂ менее 0.05 %, N₂ менее 0.2 %, H₂ менее 0.3 %). Ненормируемые в этих газах примеси (водяной пар, углекислый газ, углеводороды и др.) преимущественно осаждаются на охлаждаемых стенках разрядной камеры. В большинстве экспериментов начальная (до начала импульса ЭИ разряда) температура газа T_0 в исследуемой части активной среды составляла ~ 120 К, но в некоторых экспериментах она была выше, что указывается при описании результатов таких экспериментов. Длительность импульса ЭИ разряда равнялась 0.04 мс. Среднее значение удельного энерговыхода Q_{in} , т. е. количества энергии, вложенной в газ при импульсном разряде, в различных экспериментах составляло от 20 до 600 Дж·л⁻¹·Амага⁻¹.

Измерение временной динамики КУСС в активной среде импульсного лазерного усилителя проводилось методом лазерного зондирования, подробно описанным в [49]. Для измерения КУСС зондирующее излучение направлялось вдоль оси разрядной камеры лазерного усилителя при позиционировании зондирующего лазерного пучка (диаметром ~ 1 см) в середине межэлектродного промежутка, который составлял 9 см при ширине электродов 16.5 см. В качестве зондирующего лазера применялся непрерывный частотно-селективный СО-лазер низкого давления, накачиваемый газовым разрядом постоянного тока при криогенном охлаждении газовой смеси [49]. Зондирующий СО-лазер излучал в полосе основных колебательных переходов на более чем 200 спектральных линиях. Лазерное зондирование активной среды усилителя проводилось на переходах $v + 1 \rightarrow vP(J)$, т. е. на переходах Р-ветви колебательной полосы $v + 1 \rightarrow v$ с вращательным квантовым числом J . Для изучения временной динамики КУСС были выбраны переходы с $v = 4 - 23$ и с близкими значениями J (от 13 до 15). Длина волны излучения зондирующего СО-лазера контролировалась с помощью спектрометра ИКС-31, оснащенного микрокриогенным фотоприемником (Ge: Au). Интенсивность зондирующего лазерного пучка (не более 1 Вт·см⁻²) была много меньше интенсивности насыщения усиления ($\sim 10^2$ Вт·см⁻² [50]) в активной среде импульсного лазерного усилителя. Сигналы с фотодетекторов РЕМ-L-3 (Hg–Cd–Zn–Te), пропорциональные интенсивности зондирующего и усиленного излучения, регистрировались осциллографом Tektronix TDS2014, затем на основе анализа этих сигналов рассчитывался КУСС. Погрешность измерения КУСС составляла в среднем ~ 0.05 м⁻¹. Временная динамика КУСС $G(t)$ после накачки имела характер кратковременного (длительностью не более 0.02 с) всплеска, поэтому для краткости временную динамику

$G(t)$ будем называть импульсом КУСС, или импульсом усиления/поглощения.

3. Временная динамика КУСС

В наших экспериментах временная динамика КУСС сначала измерялась для смесей $\text{CO}:\text{He} = 1:4$ и $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:9$, при плотности $N_g = 0.1$ Амага (Амага – внесистемная единица относительной плотности, 1 Амага = 44.615 моль·м⁻³), а затем в эти смеси добавлялся кислород в количестве от 0.02 до 2.0 по отношению к концентрации молекул СО и проводились новые измерения динамики КУСС.

При добавлении кислорода в рабочую смесь импульсного лазерного усилителя импульс КУСС изменялся различным образом в зависимости от номера ν зондируемого колебательного перехода. По характеру воздействия добавления кислорода на значения КУСС зондированные переходы можно условно разделить на следующие группы:

- «высокорасположенные» переходы ($\nu > 17$), для которых добавление кислорода приводило к снижению значений максимального КУСС;
- «низкорасположенные» переходы ($\nu = 6 - 13$), для которых максимальные значения КУСС, наоборот, возрастали при добавлении кислорода;
- «промежуточные» переходы ($\nu = 14 - 17$), для которых изменение максимального КУСС (увеличение или уменьшение) зависело от содержания кислорода в газовой смеси.

Чтобы характеризовать временную динамику КУСС, введем следующие параметры: $\tau_{0.1}$ – момент времени, когда КУСС на исследуемом переходе первый раз достигает значения $0.1G_{\max}$, где G_{\max} – максимальное значение КУСС за импульс усиления; $\tau_{0.9}$ – момент времени, когда КУСС первый раз за импульс достигает значения $0.9G_{\max}$; $\Delta_f = \tau_{0.9} - \tau_{0.1}$ – время нарастания усиления или, точнее, интервал времени, в течение которого КУСС увеличивается от $0.1G_{\max}$ до $0.9G_{\max}$; $\Delta_{0.1}$ – временной интервал, в течение которого КУСС превышает 0.1 от максимума усиления ($G(t) > 0.1G_{\max}$), значение $\Delta_{0.1}$ близко к времени существования инверсной населенности (ИН) в лазерной среде; $\Delta_{0.5}$ – временной интервал, в течение которого КУСС превышает половину максимума усиления ($G(t) > 0.5G_{\max}$).

3.1. Гелиевая смесь с добавлением кислорода

Временная динамика КУСС в гелиевой смеси $\text{CO}:\text{He} = 1:4$ на переходах от $\nu = 4$ до 23 подробно исследовалась в работах [45, 46, 51, 52] при различных значениях удельного энерговклада. Добавление в такую смесь небольшого количества кислорода ($X = 0 - 0.02$) приводило к резкому уменьшению КУСС на «высокорасположенных» переходах $19 \rightarrow 18\text{P}(13)$, $21 \rightarrow 20\text{P}(14)$ и $24 \rightarrow 23\text{P}(15)$ и к сокращению временного интервала $\Delta_{0.1}$, т. е. времени жизни ИН.

Рассмотрим изменение формы импульса КУСС на примере одного из «высокорасположенных» переходов. На рис.1 изображена временная динамика КУСС на переходе $19 \rightarrow 18\text{P}(13)$ при шести значениях содержания кислорода в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ при удельном энерговкладе $Q_{\text{in}} = 130$ Дж·л⁻¹·Амага⁻¹. По мере увеличения содержания кислорода импульс усиления становился более коротким. Отметим, что в кислородсодер-

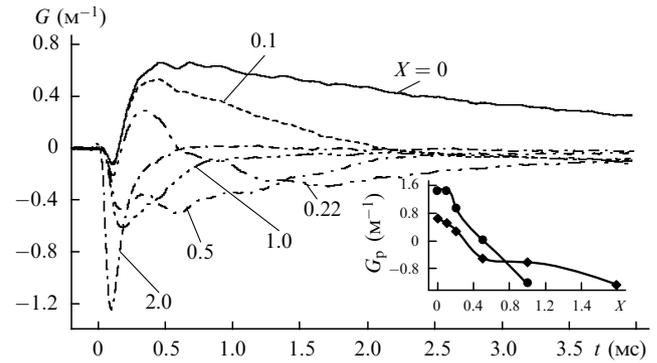


Рис.1. Временная динамика КУСС в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ на переходе $19 \rightarrow 18\text{P}(13)$ для шести значений X , $Q_{\text{in}} = 130$ Дж·л⁻¹ × Амага⁻¹. На врезке представлена зависимость пикового КУСС (G_p) от X для $Q_{\text{in}} = 240$ (●) и 130 Дж·л⁻¹·Амага⁻¹ (◆); ошибка измерения укладывается в размер маркера.

жащих смесях при $X = 0.1$ и 0.22 после усиления излучения значение КУСС становилось отрицательным, т. е. усиление сменялось поглощением излучения. При более высоком содержании кислорода (при X от 0.5 до 2.0) зондирующее излучение только поглощалось, причем с возрастанием содержания кислорода в смеси длительность импульса поглощения уменьшалась.

Чтобы сравнивать значения КУСС как при усилении излучения, так и при его поглощении, введем G_p – пиковый КУСС, который при наличии усиления равен пиковому (максимальному) значению КУСС ($G_p = G_{\max} > 0$), а при поглощении – пиковому значению коэффициента поглощения ($G_p < 0$). На врезке рис.1 представлен график изменения G_p в зависимости от содержания кислорода X в рабочей смеси для двух значений удельного энерговклада Q_{in} . При увеличении содержания кислорода значения G_p уменьшались.

На «низкорасположенных» колебательно-вращательных переходах $7 \rightarrow 6\text{P}(14)$, $10 \rightarrow 9\text{P}(15)$ и $14 \rightarrow 13\text{P}(14)$ картина менялась на противоположную – при добавлении кислорода коэффициент усиления увеличивался. Динамика КУСС для «низкорасположенных» переходов представлена на примере перехода $10 \rightarrow 9\text{P}(15)$ при пяти значениях X (рис.2). Отметим, что погрешность измерения КУСС составляла в среднем ~ 0.05 м⁻¹, однако при измерениях больших значений КУСС ($|G| > 2$ м⁻¹, т. е. когда интенсивность усиленного (поглощенного) излучения изменялась более чем в 10 раз) погрешность измере-

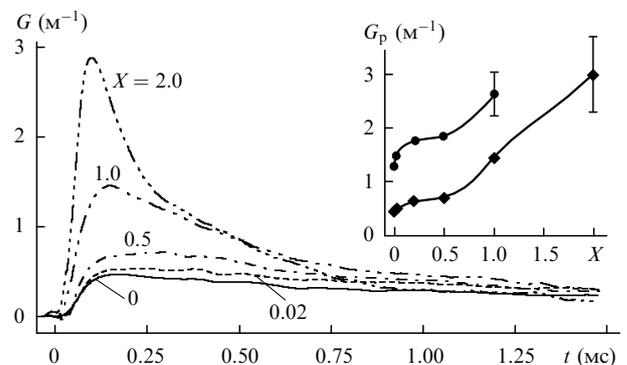


Рис.2. Временная динамика КУСС в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ на переходе $10 \rightarrow 9\text{P}(15)$ для пяти значений X ($Q_{\text{in}} = 130$ Дж·л⁻¹ × Амага⁻¹). На врезке представлена зависимость G_p от X для $Q_{\text{in}} = 240$ (●) и 130 Дж·л⁻¹·Амага⁻¹ (◆); если не указана ошибка измерения, то она укладывается в размер маркера.

Табл.1. Параметры, характеризующие временную динамику КУСС на «низкорасположенных» переходах $14 \rightarrow 13$ P(13), $10 \rightarrow 9$ P(15) и $7 \rightarrow 6$ P(14) в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ при энергокладе $Q_{\text{in}} = 130$ Дж·л⁻¹·Амага⁻¹, в зависимости от содержания кислорода.

Переходы	X	G_{max} (М ⁻¹)	$\tau_{0,9}$ (мс)	Δ_f (мс)	$\Delta_{0,5}$ (мс)	$\Delta_{0,1}$ (мс)
$14 \rightarrow 13$ P(13)	0	0.65	0.20	0.12	2.5	> 9
	0.1	0.90	0.26	0.17	1.6	5.2
	0.5	1.0	0.17	0.10	1.3	2.7
	1	1.2	0.12	0.06	0.62	1.7
	2	2.1 ± 0.15	0.08	0.03	0.25	0.67
$10 \rightarrow 9$ P(15)	0	0.45	0.11	0.07	1.3	7
	0.5	0.70	0.13	0.08	1.4	4.0
	1	1.5	0.10	0.07	0.52	2.5
	2	3.1 ± 0.7	0.08	0.05	0.20	1.0
	0	0.60	0.07	0.04	0.53	3.7
$7 \rightarrow 6$ P(14)	0.1	0.70	0.07	0.04	0.52	1.6
	0.5	0.75	0.07	0.04	0.48	1.6
	1	0.80	0.07	0.04	0.48	1.2
	2	2.0 ± 0.1	0.05	0.03	0.15	0.65

ний возрастала. Например, при $X = 2$ параметр G_{max} на переходе $10 \rightarrow 9$ P(15) принимал в различных экспериментах значения от 2.4 до 3.8 м⁻¹. Поэтому далее в работе для $G \geq 2$ м⁻¹ указывается среднее измеренное значение и 95 %-ный доверительный интервал. Временные параметры для всех трёх переходов уменьшались с ростом X при содержании кислорода свыше 0.1 (табл.1), причем значения этих параметров приближались к их значениям для перехода $7 \rightarrow 6$ P(14).

На самом нижнем из зондированных колебательных переходов ($5 \rightarrow 4$) излучение не усиливалось, а только поглощалось для всех смесей. Добавление кислорода приводило к уменьшению длительности импульса поглощения. Например, на переходе $5 \rightarrow 4$ P(10) при $Q_{\text{in}} = 130$ Дж·л⁻¹·Амага⁻¹ длительность импульса поглощения, которая измерялась по уровню $G(t) < -1$ м⁻¹, уменьшалась от 15 мс в исходной смеси ($X = 0$) до 8 мс в смеси с $X = 2$. В смеси с $X = 4$ на соседнем колебательном переходе $6 \rightarrow 5$ при $Q_{\text{in}} = 100$ Дж·л⁻¹·Амага⁻¹ для $J = 13$ усиление наблюдалось на очень коротком интервале длительностью ~ 0.1 мс ($G_{\text{max}} \approx 0.3$ м⁻¹), после чего зондирующее излучение только поглощалось на протяжении более 5 мс (пиковое значение коэффициента поглощения $G_p \approx -0.9$ м⁻¹). Отметим, что в тех же условиях при зондировании активной среды лазерного усилителя на переходе $6 \rightarrow 5$ P(9) зондирующее излучение не усиливалось, а только поглощалось ($G_p \approx -2.5$ м⁻¹).

На «промежуточном» переходе $18 \rightarrow 17$ P(15), который был выбран в качестве примера, при увеличении X от 0 до 0.07 параметр G_p возрастал в 1.4 раза. При дальнейшем увеличении содержания кислорода ($X > 0.07$) значение G_p монотонно уменьшалось, причем для смеси с $X > 0.1$ после завершения импульса усиления КУСС принимал отрицательные значения. Увеличение содержания кислорода приводило к значительному уменьшению временных параметров $\Delta_{0,1}$ и $\Delta_{0,5}$ (табл.2).

3.2. Азотные смеси с добавлением кислорода

До сих пор рассматривались результаты экспериментов по измерению временной динамики КУСС при добавлении молекулярного кислорода в гелиевую рабочую

Табл.2. Параметры, характеризующие временную динамику КУСС на «промежуточном» переходе $18 \rightarrow 17$ P(15) в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$, в зависимости от содержания кислорода.

Q_{in} (Дж·л ⁻¹ ·Амага ⁻¹)	X	G_{max} (М ⁻¹)	$\tau_{0,9}$ (мс)	Δ_f (мс)	$\Delta_{0,5}$ (мс)	$\Delta_{0,1}$ (мс)
130	0	0.38	0.36	0.22	> 4	> 8
	0.07	0.54	0.26	0.15	1.2	3.4
	0.1	0.50	0.26	0.15	1.2	3.4
	0.2	0.44	0.26	0.15	0.72	1.6
	0.5	0.22	0.25	0.12	0.25	0.50
	1.0	0.08	0.13	0.03	0.10	0.15
	0	1.05	0.16	0.10	1.6	8
	0.07	1.48	0.16	0.10	0.70	2.5
	0.1	1.4	0.15	0.09	0.70	2.0
	0.2	1.2	0.12	0.06	0.50	1.2
240	0.5	0.86	0.12	0.05	0.32	0.45
	1.0	0.38	0.12	0.03	0.08	0.12

смесь $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$. Аналогичные эксперименты были проведены при добавлении кислорода в азотную рабочую смесь $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2 = 1:9:X$ [52]. Измерение временной динамики КУСС в азотной смеси проводилось на двух переходах: на «высокорасположенном» переходе $19 \rightarrow 18$ P(13) и на «низкорасположенном» переходе $10 \rightarrow 9$ P(15). На переходе $19 \rightarrow 18$ P(13) добавление кислорода приводило к такому же резкому уменьшению коэффициента усиления, как и в гелиевой смеси. При содержании кислорода $X = 1$ излучение зондирующего лазера только поглощалось, а при увеличении X от 1 до 4 длительность импульса КУСС (поглощения) постепенно сокращалась.

На «низкорасположенном» переходе $10 \rightarrow 9$ P(15) максимальное значение КУСС при добавлении кислорода возрастало. При удельном энергокладе $Q_{\text{in}} = 130$ Дж·л⁻¹·Амага⁻¹ значение G_p увеличивалось для смеси с $X = 4$ в два раза по сравнению с исходной смесью, а при $Q_{\text{in}} = 230$ Дж·л⁻¹·Амага⁻¹ – в полтора раза. Отметим, что в азотной смеси устойчивость ЭИ разряда была выше, чем в гелиевой смеси, причем как в смеси исходного состава, так и в смеси с добавлением кислорода (до $X = 4$). Значения временных параметров $\tau_{0,9}$ и Δ_f , характеризующих нарастание КУСС, уменьшались при добавлении кислорода незначительно (табл.3). Более заметно изменялись значения параметров $\Delta_{0,5}$ и $\Delta_{0,1}$, характеризующих время жизни ИН.

Табл.3. Параметры, характеризующие временную динамику КУСС на «низкорасположенном» переходе $10 \rightarrow 9$ P(15) в смеси $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2 = 1:9:X$, в зависимости от содержания кислорода.

Q_{in} (Дж·л ⁻¹ ·Амага ⁻¹)	X	G_{max} (М ⁻¹)	$\tau_{0,9}$ (мс)	Δ_f (мс)	$\Delta_{0,5}$ (мс)	$\Delta_{0,1}$ (мс)
130	0	0.26	0.12	0.06	1.1	2.8
	1	0.26	0.11	0.06	0.90	2.2
	2	0.44	0.11	0.06	0.85	2.2
	4	0.56	0.10	0.06	0.68	2.0
230	0	0.68	0.08	0.04	1.25	3.0
	1	0.69	0.09	0.05	0.90	2.4
	2	0.85	0.09	0.05	0.64	2.0
	4	1.12	0.08	0.04	0.63	1.8

4. Обсуждение экспериментальных данных по измерению КУСС

Обсудим механизмы, которые могут приводить к тому, что на «низкорасположенных» колебательных переходах КУСС возрастает при добавлении кислорода в рабочую смесь импульсного лазерного СО-усилителя. Отчасти увеличение КУСС связано с тем, что большинство измерений в наших экспериментах проводилось на таких колебательно-вращательных переходах, на которых частичная инверсная населенность возрастает при нагреве газа. Напомним, что населенность вращательных уровней молекулы СО описывается распределением Больцмана и при одинаковой колебательной температуре инверсная населенность на колебательно-вращательном переходе существенно зависит от температуры газа [44, 49].

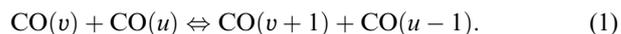
Чтобы оценить, насколько нагревалась рабочая смесь лазерного усилителя после импульса накачки, было проведено измерение КУСС в колебательной полосе $10 \rightarrow 9$ на трёх колебательно-вращательных переходах с $J = 7, 10$ и 15 для трёх значений X (0, 1 и 2) в смеси состава $\text{CO} : \text{He} : \text{O}_2 = 1 : 4 : X$ с начальной температурой $T_0 \approx 130$ К при удельном энергокладе $Q_{\text{in}} = 130 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{Амага}^{-1}$. Для обработки результатов измерения КУСС применялась процедура восстановления температуры газа и населенности колебательных уровней, описанная в работах [44, 49]. Температура газа T_g и относительная населенность $n_v = N_v/N_{\text{CO}}$ (N_{CO} – концентрация молекул СО) для $v = 9$ возрастали с увеличением содержания кислорода X (рис.3). К моменту времени $t = 0.1$ мс, когда так называемый быстрый нагрев [53] рабочей смеси газов, про-

исходящий непосредственно в течение импульса накачки (0.04 мс), уже завершился, температура активной среды увеличилась в исходной смеси $\text{CO} : \text{He} = 1 : 4$ от $T_0 \approx 130$ К до $T_g \approx 140$ К, в смеси с содержанием кислорода $X = 1$ до $T_g \approx 160$ К, в смеси с $X = 2$ до $T_g \approx 185$ К (рис.3,а). Последующий (при $t > 0.1$ мс) нагрев газа связан, по-видимому, с процессами колебательно-поступательной (VT) релаксации колебательной энергии молекул. Таким образом, скорость нагрева кислородсодержащих смесей была выше, чем исходной смеси, что следует учитывать, если применять эти смеси, например, в лазерах с непрерывной или импульсно-периодической накачкой.

Наши оценки показали, что только из-за нагрева на ~ 50 К рабочей смеси КУСС может увеличиться на колебательно-вращательном переходе $10 \rightarrow 9$ с вращательным числом $J = 15$, но на двух других переходах, с $J = 7$ и 10 , значения КУСС должны были бы уменьшиться. Однако эксперимент показал, что увеличение X от 0 до 2 приводило к тому, что G_p увеличивалось для всех трёх переходов. Поэтому увеличение G_p на «низкорасположенных» колебательных переходах при добавлении кислорода в рабочую смесь слабо связано с нагревом газа.

Увеличение G_p на «низкорасположенных» колебательных переходах вызвано, по-видимому, увеличением населенности соответствующих колебательных уровней в кислородсодержащих смесях. 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.3,б).

Рассмотрим теперь процессы обмена колебательной энергией между молекулами, поскольку именно ими определяется временная динамика КУСС в активной среде импульсного СО-лазера. В процессе импульсной накачки заселяются самые нижние колебательные уровни молекулы СО [54]. Заселение более высоких уровней происходит в процессах VV-обмена между молекулами СО:



В наших экспериментах излучение зондирующего лазера на колебательных переходах $5 \rightarrow 4$ и $6 \rightarrow 5$ только поглощалось в среде лазерного усилителя, а на переходе $7 \rightarrow 6$ имелось значительное усиление. Это указывает на то, что «плато» КФР [55, 56] начинается на колебательном уровне $v_T \approx 5$, который соответствует минимуму триноровской функции распределения [55–58]. Отсюда можно оценить значение эффективной колебательной температуры, определяемой соотношением (см., напр., [58]) $\Theta(v) = E_v [k \ln(N_{v-1}/N_v)]^{-1}$, где E_v – энергия колебательного перехода, а k – постоянная Больцмана. Колебательная температура первого колебательного уровня молекул СО связана с номером v_T соотношением [58] $\Theta_{\text{CO}}(v=1) = T_g E_{v=1} / [\Delta E (2v_T - 1)]$, где ΔE – постоянная ангармонизма молекулы СО, поэтому для $v_T \approx 5$ при $T_g \approx 140$ К получаем $\Theta_{\text{CO}}(v=1) \approx 2.4 \times 10^3 \text{ К} \approx 0.22 \text{ эВ}$.

Присутствие в рабочей газовой смеси других молекул (N_2 , O_2 и др.) оказывает значительное влияние на временные параметры КУСС, поскольку в среде происходят процессы межмолекулярного VV'-обмена колебательной энергией. На рис.4 представлена диаграмма энергии колебательных переходов E_v для трех молекул (O_2 , СО и N_2). Отметим, что из перечисленных молекул самой большой энергией колебательного перехода $0 \rightarrow 1$

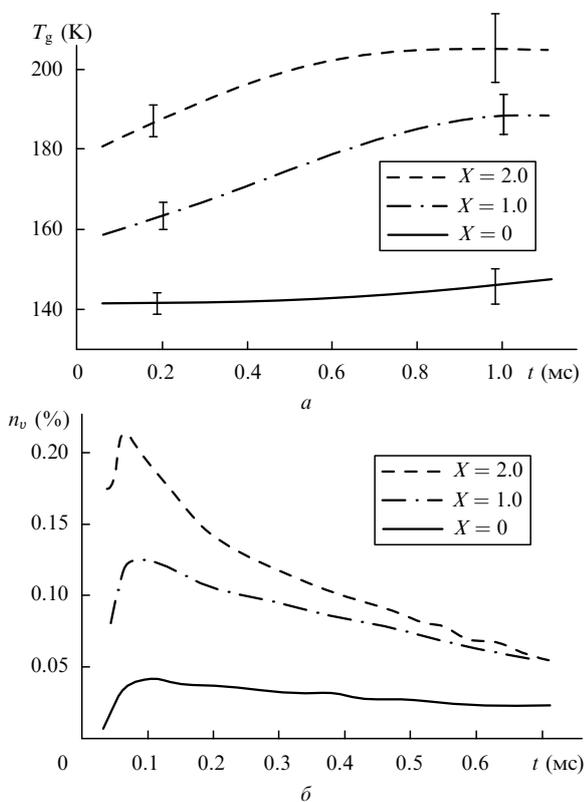
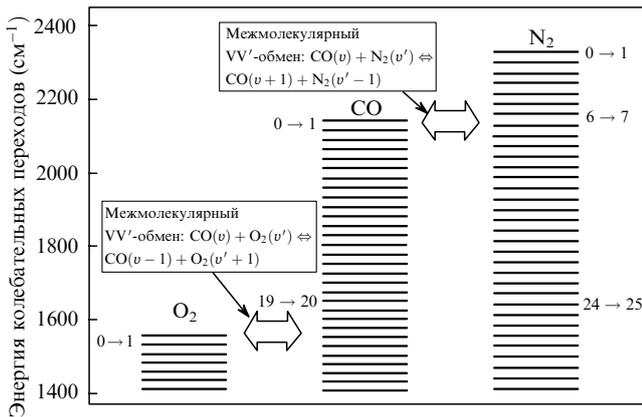
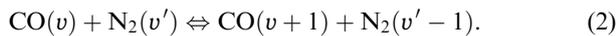


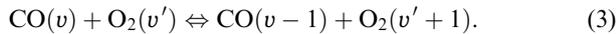
Рис.3. Временная динамика температуры газа T_g (а) и относительной населенности n_v колебательного уровня $v = 9$ (б) в смеси $\text{CO} : \text{He} : \text{O}_2 = 1 : 4 : X$ для трех значений X при $Q_{\text{in}} = 130 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{Амага}^{-1}$, $T_0 \approx 130$ К.

Рис.4. Энергия колебательных переходов молекул O₂, CO, N₂.

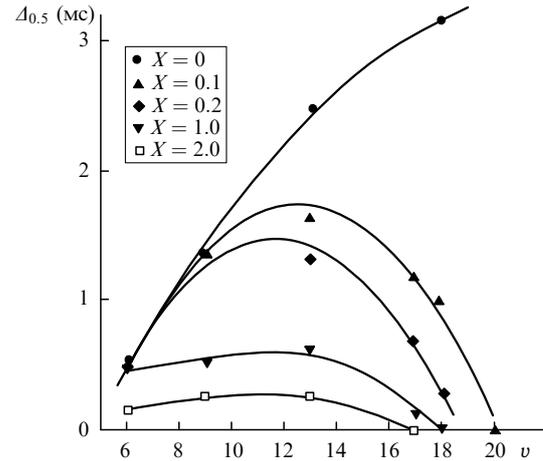
($\sim 2330 \text{ см}^{-1}$) обладает молекула азота. В рабочей смеси СО-лазера азот играет роль резервуара колебательной энергии, поскольку в процессе накачки происходит заселение колебательно-возбужденных состояний молекулы азота, а затем эта колебательная энергия передается молекулам СО путем межмолекулярного VV'-обмена:



Подобный VV'-обмен происходит между молекулами СО и O₂ (см., напр., [59]):



Энергия колебательного перехода $0 \rightarrow 1$ для молекулы кислорода ($\sim 1560 \text{ см}^{-1}$) значительно меньше, чем для окиси углерода ($\sim 2140 \text{ см}^{-1}$). Однако для молекул СО, находящихся в высоковозбужденных колебательных состояниях (при $v \approx 20$), VV'-обмен (3) носит резонансный характер (рис.4). В процессах межмолекулярного VV'-обмена (3) система, состоящая из колебательно-возбужденных молекул СО и O₂, стремится к динамическому равновесию, при котором достигается равная вероятность прямого и обратного VV'-обмена. Для бинарной смеси ангармонических осцилляторов такое равновесие достигается при равенстве их эффективных колебательных температур [58]. Для смеси колебательно-возбужденных молекул СО и O₂ условие динамического равновесия VV'-обмена (3) имеет вид $\theta_{\text{CO}}(v \approx 20) = \theta_{\text{O}_2}(v' = 1)$. В условиях проведенных экспериментов для исходной рабочей смеси ($X = 0$) квазиравновесная КФР f_v для колебательных уровней $v \sim 20$ имеет вид плато, и её можно представить в виде $f_v \sim (v+1)^{-1}$ [58], при этом $\ln(N_{v-1}/N_v) = \ln(1+v^{-1}) \approx 1/v$. Учитывая, что $E_{v \approx 20}/k \approx 2.3 \times 10^3 \text{ К}$, можно оценить значение эффективной колебательной температуры $\theta_{\text{CO}}(v \approx 20) \approx v(2.3 \times 10^3 \text{ К}) \approx 5 \times 10^4 \text{ К} \approx 4 \text{ эВ}$, причем относительная населенность этих уровней составляет $n_{v \approx 20} \sim 10^{-4}$ [44, 49, 58]. Добавление в такую среду молекул кислорода при $X < 10^{-4}$ почти не изменяет вид КФР для молекул СО, но сами молекулы O₂ переходят при этом в высоковозбужденные состояния. Увеличение содержания кислорода приводит к тому, что колебательная температура $\theta_{\text{CO}}(v \approx 20)$ уменьшается, а при $X \gg 10^{-4}$ КФР молекул СО для уровней $v \approx 20$ почти повторяет быстро спадающую функцию распределения молекул O₂ на нижних колебательных уровнях. Таким образом, при добавлении кислорода ($X > 0.01$) существенно изме-

Рис.5. Зависимости временного параметра $\Delta_{0,5}$ от колебательного квантового числа v для смеси CO:He:O₂ = 1:4:X при пяти значениях X ($Q_{\text{in}} = 130 \text{ Дж} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{Амаг}^{-1}$).

няется вид КФР: для уровней, близких к $v \approx 20$, вместо плато образуется резкий спад КФР. В азотсодержащей рабочей смеси квазистационарная КФР изменяется при добавлении кислорода как для молекул СО, так и для молекул N₂, поэтому влияние содержания кислорода X на временную динамику КУСС проявляется в меньшей степени для азотной смеси, чем для гелиевой.

Время жизни ИН на всех исследованных переходах сокращалось при увеличении содержания кислорода в рабочей смеси. На рис.5 представлено изменение временного параметра $\Delta_{0,5}$, характеризующего время жизни ИН по уровню $0.5G_p$, в зависимости от колебательного квантового числа v в смеси CO:He:O₂ = 1:4:X. При добавлении кислорода в исходную смесь параметр $\Delta_{0,5}$ уменьшался для всех переходов, причем более резкое сокращение времени жизни ИН происходило для высоких колебательных переходов. Временные параметры КУСС уменьшались для всех колебательных переходов из-за того, что при VV'-обмене (3) колебательная энергия, запасенная молекулами СО, расходуется на возбуждение молекул O₂, которые имеют более высокую скорость колебательно-поступательной VT-релаксации ($\sim 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ [40, 60]), чем молекулы СО ($\sim 10^{-16} \text{ см}^3/\text{с}$ [60]). Высокая скорость VT-релаксации молекул O₂ проявляется в том, что кислородсодержащая рабочая смесь лазерного усилителя нагревается после импульсной накачки до более высокой температуры, чем исходная смесь. При увеличении содержания кислорода возрастает скорость релаксации колебательной энергии молекул СО, и чем ближе номер колебательного уровня v к резонансу VV'-обмена (3) при $v \approx 20$, тем чувствительнее к содержанию кислорода становятся временные параметры импульса КУСС.

При добавлении кислорода в рабочую смесь лазерного усилителя пиковое значение КУСС на «высокорасположенных» колебательных переходах уменьшалось, и чем выше располагался переход, тем меньше требовалось кислорода, чтобы усиление излучения сменилось поглощением ($G_p < 0$) (рис.6). Уменьшение значений G_p при добавлении кислорода обусловлено спадом КФР для молекул СО под действием межмолекулярного VV'-обмена (3). На «низкорасположенных» колебательных переходах зависимость иная: при увеличении X от 0 до 2 значение G_p только возрастало, причем многократно (рис.6). Увеличение КУСС при использовании кислородсодержащих

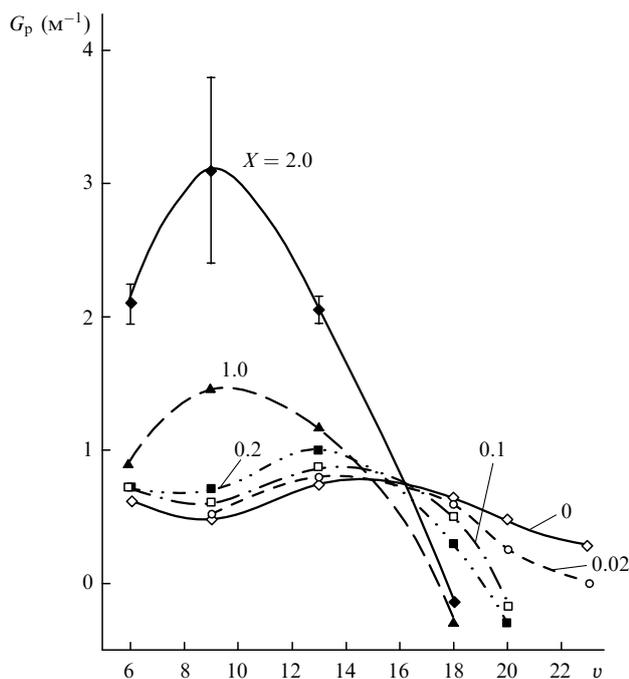


Рис.6. Зависимости пикового значения КУСС от числа v для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ при шести значениях X ; для $G_p \geq 2$ указаны 95 %-ные доверительные интервалы ($Q_{\text{in}} = 130 \text{ Дж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{Амага}^{-1}$).

газовых смесей в импульсных СО-лазерах является важным результатом с точки зрения как выбора смеси мощных ЭИ СО-лазеров, так и разработки компактных импульсно-периодических СО-лазеров [61, 62].

Проведенные эксперименты продемонстрировали, что добавление кислорода в рабочую смесь лазерного усилителя увеличивает скорость релаксации колебательной энергии, запасенной молекулами СО; кроме того, процессы VV' -обмена (3) могут приводить к накоплению частиц на «низкорасположенных» колебательных уровнях молекулы СО. Действительно, колебательная энергия посредством VV -обмена (1) передается от самых нижних колебательных уровней молекулы СО, на которых запасена основная часть энергии, на уровни $v \approx 20$, где происходит обмен колебательной энергией с молекулами кислорода. Вместе с тем поток колебательной энергии Φ_v при VV -обмене (1) существенно зависит от населенности промежуточных уровней, причем в области плато КФР выражение для потока энергии имеет вид $\Phi_v \sim N_v^2$ [58]. Механизм увеличения населенности на «низкорасположенных» колебательных уровнях можно связать, как предлагалось в [31, 45, 46, 51, 52], непосредственно с процессами VV' -обмена (3), поскольку при передаче колебательной энергии от СО к кислороду молекула СО спускается вниз на один колебательный уровень $v \rightarrow v - 1$. В этом смысле процессы (3) выступают в роли преграды для заселения «высокорасположенных» колебательных уровней СО, при этом происходит накопление молекул СО на «низкорасположенных» колебательных уровнях. Аналогичный эффект наблюдался при добавлении азота в активную среду СО-лазера, генерирующего на высоких колебательно-вращательных переходах в полосе первого колебательного обертона молекулы СО [47]. Несимметричный VV' -обмен между молекулами окиси углерода и азота $\text{CO}(v+2) + \text{N}_2(v') \rightleftharpoons \text{CO}(v) + \text{N}_2(v'+1)$, где $v \approx 40$ и $v' \approx 1$, приводил к снижению коэффициента усиления на переходах, близких к резонансному ($v > 34$), и, наоборот,

к увеличению КУСС на ниже расположенных переходах ($v = 24 - 34$).

Таким образом, анализ результатов проведенных экспериментов позволяет объяснить изменение формы импульса КУСС при добавлении кислорода в рабочую смесь импульсного лазерного усилителя только процессами внутримолекулярного VV -обмена молекул СО и межмолекулярного VV' -обмена между молекулами СО и O_2 без привлечения плазмохимических процессов.

5. Генерация излучения в импульсном ЭИ СО-лазере на кислородсодержащих газовых смесях

5.1. Основные переходы

Энергетические и временные характеристики излучения импульсного ЭИ СО-лазера исследовались для смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ при $X = 0 - 4$. При добавлении кислорода плотность газа изменялась от 0.1 до 0.18 Амага. Выходные окна ЭИ разрядной камеры, изготовленные из CaF_2 , устанавливались под углом Брюстера к оси лазерного резонатора, причем ось резонатора проходила 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 от 5 до 6 мкм. Спектр излучения лазера регистрировался ИК спектрографом. Апертура выходного излучения была ограничена диафрагмой диаметром 30 мм, установленной внутри лазерного резонатора вблизи выходного зеркала. Временная форма импульса генерации регистрировалась микрокриогенным фотоприемником ($\text{Ge}:\text{Au}$) с помощью осциллографа Tektronix TDS2014.

На рис.7 представлена временная зависимость мощности излучения лазера, нормированной на её максимальное значение. При добавлении кислорода в рабочую смесь уменьшались временные параметры импульса лазерного излучения. При увеличении 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 до 20 мкс.

На рис.8 показаны значения удельного лазерного энерговысвобождения Q_{out} в зависимости от удельного энерговысвобождения Q_{in} при различных X . Отметим, что при увеличении X сокращалось значение порогового энерговысвобождения Q_t (табл.4), при превышении которого начинается генера-

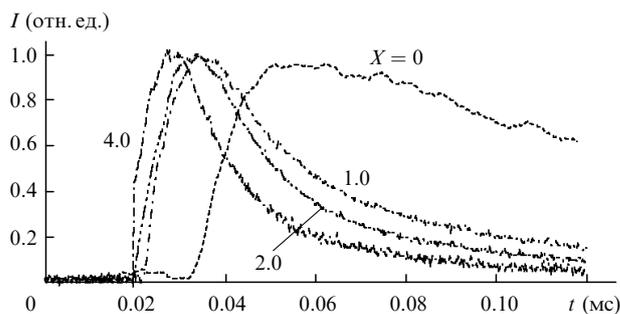


Рис.7. Временные зависимости нормированной мощности лазерного излучения для рабочей смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ для четырех значений X ($Q_{\text{in}} = 130 \text{ Дж}\cdot\text{л}^{-1}\cdot\text{Амага}^{-1}$).

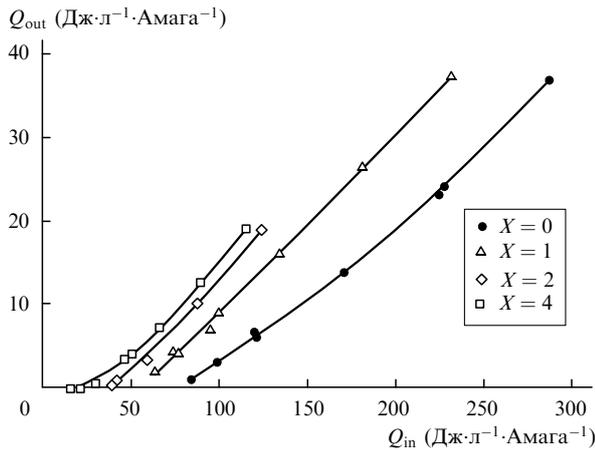


Рис.8. Зависимости удельного лазерного энергосъема от удельного энерговклада при различных X в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$.

Табл.4. Параметры, характеризующие генерацию лазерного излучения в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$, в зависимости от содержания кислорода.

Параметр	$X = 0$	$X = 1$	$X = 2$	$X = 4$
N_g (Амага)	0.10	0.12	0.14	0.18
Q_t (Дж·л ⁻¹ ·Амага ⁻¹)	74	56	37	28
Максимальный КПД (%)	17	23	25	27
Q_m (Дж·л ⁻¹ ·Амага ⁻¹)	290	230	125	115

Примечание: Q_t – пороговый энерговклад; Q_m – удельный энерговклад, при котором достигался максимальный КПД.

ция излучения. (При энерговкладе Q_t потери излучения в лазерном резонаторе полностью компенсируются усилением в активной среде.) Уменьшение порогового энерговклада означает, что при добавлении кислорода наибольшее среди всех колебательно-вращательных переходов значение КУСС становится равным коэффициенту потерь излучения в лазерном резонаторе при меньшем значении энерговклада Q_{in} . Эффективность преобразования вложенной при импульсной накачке в активную среду лазера энергии в энергию импульса лазерного излучения (КПД = $(Q_{out}/Q_{in}) \times 100\%$) увеличивалась при добавлении кислорода (рис.9). С увеличением содержания кислорода КПД лазера возрастал и достигал максимального значения при меньшей величине удельного энерговклада Q_m (табл.4). Например, в исходной смеси КПД = 17% достигался при $Q_m = 290$ Дж·л⁻¹·Амага⁻¹, а в смеси

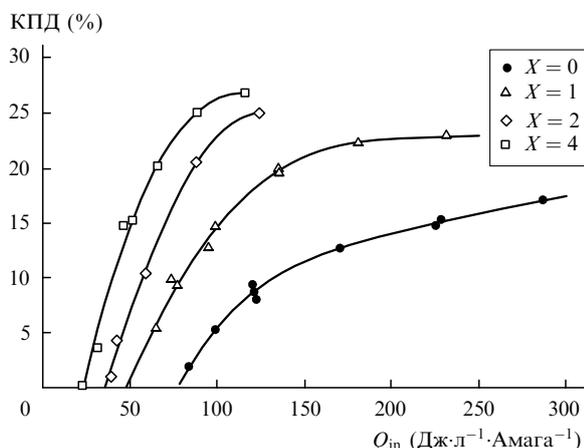


Рис.9. Зависимости КПД электроионизационного СО-лазера от Q_{in} при различных X в смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$.

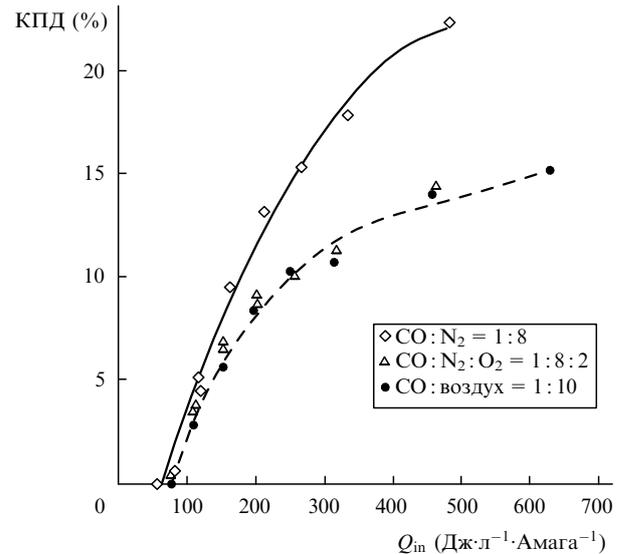


Рис.10. Зависимости КПД электроионизационного СО-лазера от Q_{in} для различных рабочих смесей ($T_0 \approx 130$ К).

с $X = 4$ более высокое значение КПД = 27% было получено при меньшем энерговкладе ($Q_m = 115$ Дж·л⁻¹·Амага⁻¹). Спектр излучения лазера при максимальном для исследованных смесей удельном энерговкладе лежал в диапазоне 5.0–5.4 мкм.

С тем же лазерным резонатором была исследована генерация излучения импульсного ЭИ СО-лазера на смесях $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2$. В этих экспериментах отслеживалось изменение энергетических характеристик такого лазера при добавлении кислорода в исходную рабочую смесь $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:8$. На рис.10 представлена зависимость КПД от удельного энерговклада для СО-лазера, работающего в режиме свободной генерации, на смесях $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:8$ ($N_g = 0.1$ Амага), $\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2 = 1:8:2$ (т.е. смесь СО с искусственным воздухом, $N_g = 0.12$ Амага) и $\text{CO}:\text{воздух} = 1:10$ (для неё воздух брался из атмосферы, $N_g = 0.1$ Амага). Лазерные КПД на смесях с искусственным и атмосферным воздухом имели близкие значения и были только в 1.5 раза меньше, чем на исходной смеси $\text{CO}:\text{N}_2 = 1:8$. Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в качестве рабочей смеси импульсного криогенного ЭИ СО-лазера можно использовать кислородсодержащие смеси, включая смесь $\text{CO}:\text{воздух}$.

5.2. Обертонные переходы

Результаты исследования генерации излучения обертоного ЭИ СО-лазера [34, 35, 39] показали, что наибольший КПД лазера как в частотно-селективном режиме, так и в режиме свободной генерации достигается на «высокоскоростных» ($\nu > 24$, $\lambda > 3.2$ мкм) колебательных переходах. Поэтому возникает вопрос о том, можно ли, исходя из результатов, представленных в разд.3 и 4, повысить КУСС на «низкорасположенных» обертоных переходах ЭИ СО-лазера путём увеличения содержания кислорода в рабочей смеси.

Чтобы ответить на этот вопрос, были исследованы энергетические характеристики обертоного ЭИ СО-лазера при увеличении содержания кислорода X в лазерной смеси $\text{CO}:\text{He}:\text{O}_2 = 1:4:X$ (с увеличением плотности от $N_g = 0.1$ до 0.18 Амага). Высокодобротный лазерный резонатор длиной ~ 2.5 м был образован сферическим зеркалом с радиусом кривизны 10 м и плоским выходным

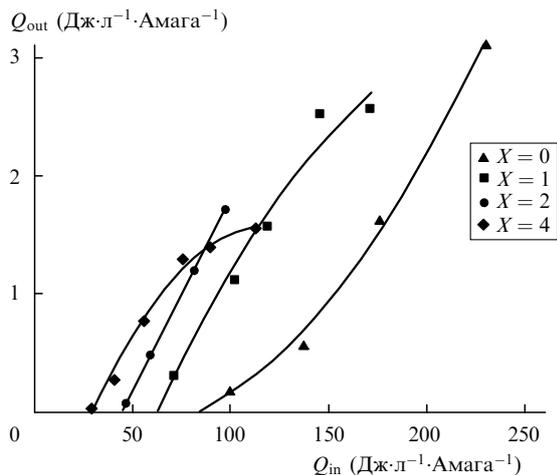


Рис.11. Зависимости Q_{out} оберточного СО-лазера от Q_{in} при различных X в смеси $CO : He : O_2 = 1 : 4 : X$.

зеркалом, установленными непосредственно на ЭИ разрядной камере. Оба зеркала имели многослойное диэлектрическое покрытие с высоким коэффициентом отражения ($\sim 99\%$) в диапазоне длин волн $2.6 - 3.0$ мкм, который соответствует «низкорасположенным» оберточным переходам, и с коэффициентом отражения $10\% - 20\%$ в диапазоне длин волн $4.5 - 7.3$ мкм (т. е. в диапазоне длин волн основных колебательных переходов). Выходная апертура лазерного излучения была ограничена круглой внутрирезонаторной диафрагмой диаметром 36 мм. Оберточный СО-лазер действовал в многочастотном режиме генерации излучения. Наличие или отсутствие генерации излучения на основных переходах контролировалось с помощью широкополосного кварцевого фильтра (толщина 2 мм, коэффициент пропускания излучения с длиной волны, большей 4.8 мкм, менее 1%). В условиях обсуждаемых экспериментов спектр генерации излучения лежал в диапазоне длин волн $2.6 - 3.0$ мкм, а генерация на основной частоте не наблюдалась.

На рис.11 представлены значения удельного лазерного энергообъема Q_{out} при различных X в рабочей смеси $CO : He : O_2 = 1 : 4 : X$. Здесь так же, как для СО-лазера на основных переходах, при увеличении содержания кислорода пороговый энергообъем Q_t уменьшался, т. е. при

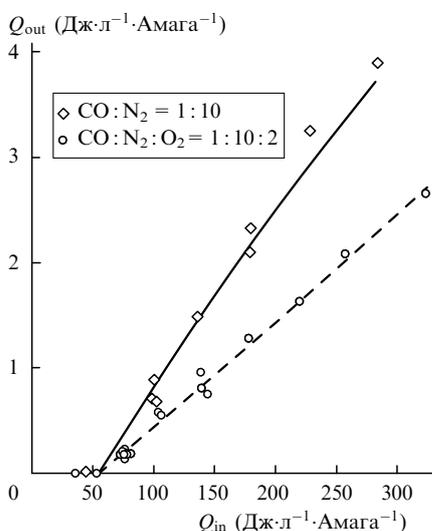


Рис.12. Зависимости Q_{out} от Q_{in} для оберточного СО-лазера с двумя рабочими смесями.

увеличении содержания кислорода КУСС на оберточных переходах достигает порогового значения при меньшей величине энергообъема.

С тем же резонатором, который был далеко не оптимальным, поскольку имел малый коэффициент вывода излучения, была получена генерация излучения оберточного СО-лазера на азотной рабочей смеси с добавкой кислорода. На рис.12 представлены значения удельного лазерного энергообъема Q_{out} для оберточного СО-лазера на смесях $CO : N_2 = 1 : 10$ ($N_g = 0.1$ Амага) и $CO : N_2 : O_2 = 1 : 10 : 2$ ($N_g = 0.12$ Амага). Лазерный энергообъем на кислородсодержащей смеси был только в 1.5 раза меньше, чем на исходной смеси $CO : N_2 = 1 : 8$. Это открывает возможности для использования кислородсодержащих смесей в качестве активной среды оберточного СО-лазера как в компактных устройствах с импульсно-периодической накачкой [61, 62], так и в мощных лазерных установках с накачкой ЭИ разрядом.

6. Заключение

Проведенные исследования показали, что добавление молекулярного кислорода в рабочую смесь импульсного ЭИ СО-лазера оказывает существенное влияние на коэффициент усиления активной среды и выходные характеристики такого лазера. Обнаружено, что при добавлении кислорода ($X = 2$) в гелиевую рабочую смесь $CO : He : O_2 = 1 : 4 : X$ пиковое значение КУСС увеличивается многократно на «низкорасположенных» колебательных переходах $v + 1 \rightarrow v$ для $v = 6 - 13$. Такое увеличение КУСС связано, прежде всего, с более высокой населенностью соответствующих колебательных уровней. На «высокорасположенных» колебательных переходах ($v > 17$) добавление кислорода уменьшает коэффициент усиления, причем в рабочей смеси с содержанием кислорода $X \geq 1$ излучение на этих переходах не усиливалось, а только поглощалось. Временные параметры динамики КУСС на всех зондированных переходах уменьшались при увеличении содержания кислорода, а газовая смесь после импульсной накачки нагревалась при этом до более высокой температуры при одинаковой величине удельного энергообъема.

По нашему мнению, наблюдаемые изменения временного поведения КУСС в активной среде лазерного усилителя можно объяснить на основе процессов VV-обмена колебательной энергией между молекулами СО и колебательно-колебательного VV'-обмена между молекулами СО и O_2 . Поскольку молекулы кислорода имеют более высокую скорость колебательно-поступательной релаксации, то такой межмолекулярный обмен увеличивает скорость релаксации колебательной энергии, запасенной молекулами СО. При этом межмолекулярный VV'-обмен играет роль преграды (на уровнях $v \approx 20$) для заселения «высокорасположенных» колебательных уровней СО, но вместе с тем способствует накоплению молекул СО на «низкорасположенных» колебательных уровнях. Поэтому при увеличении содержания кислорода в рабочей смеси КУСС на «низкорасположенных» колебательных переходах возрастает, а на «высокорасположенных» переходах уменьшается. Наряду с этим временные параметры КУСС уменьшаются на всех переходах.

Исследование генерационных характеристик импульсного ЭИ СО-лазера показало, что в рабочей смеси сос-

тава СО:Не:О₂ = 1:10:Х при увеличении содержания кислорода до Х = 4 уменьшается значение порогового энерговклада для лазера, действующего как на основных колебательных переходах $v + 1 \rightarrow v$ молекулы СО, так и на переходах первого колебательного обертона $v + 2 \rightarrow v$. Обнаружено, что при добавлении кислорода увеличивается максимальное значение КПД лазера на основных переходах, причем максимум КПД достигается при меньших значениях удельного энерговклада. Продемонстрировано, что импульсный ЭИ СО-лазер может работать на воздушной рабочей смеси, причем даже на переходах первого колебательного обертона молекулы СО. Тем самым открывается возможность для использования воздушных смесей в качестве активной среды как компактных импульсно-периодических СО-лазеров, так и мощных широкоапертурных ЭИ СО-лазеров.

Авторы выражают признательность А.П.Напартовичу, А.К.Курносому, И.В.Кочетову, Д.В.Синицыну за обсуждение результатов данного исследования, а также Р.П.Андрусенко за участие в экспериментах. Работа частично поддержана РФФИ (гранты № 05-02-17656, 06-02-08041-офи, 07-05-00765).

- Bhaumik M.L., Lacina W.B., Mann M.M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **8**, 150 (1972).
- Osgood R.M., Eppers W.C., Nichols E.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **6**, 145 (1970).
- Murray G.A., Smith A.L. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **14**, 1745 (1981).
- Григорьян Г.М., Дымшиц Б.М., Ионин Ю.З. *Квантовая электроника*, **16**, 1377 (1989).
- Григорьян Г.М., Дымшиц Б.М., Ионин Ю.З. *Квантовая электроника*, **17**, 669 (1985).
- Очкин В.Н., Савинов С.Ю., Соболев Н.Н., Трубочеев Э.А. *Квантовая электроника*, **1**, 573 (1974).
- Трубочеев Э.А. *Труды ФИАН*, **102**, 3 (1977).
- De Benedictis S., Cramarossa F., D'Agostino R. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **18**, 413 (1985).
- Morgan W.L., Fisher E.R. *Phys. Rev. A*, **16**, 1186 (1977).
- Kagan Yu.M., Kaufman Y. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **16**, 1687 (1983).
- Григорьян Г.М., Дымшиц Б.М., Ионин Ю.З. *Оптика и спектроскопия*, **65**, 766 (1988).
- Sato Y., Tsuchiya S. *J. Phys. Soc. Jap.*, **33**, 1120 (1972).
- Taine A. *Chem. Phys. Lett.*, **41**, 297 (1976).
- Басов Н.Г., Кипшакбаев А.И., Ковш И.Б., Пантелеев В.И. *ЖТФ*, **56**, 1573 (1986).
- Kanazawa H., Yamaguchi N., Nakajima T., Taira T. *Rev. Sci. Instrum.*, **62**, 2379 (1991).
- Алейников В.С., Масычев В.И. *Лазеры на окиси углерода* (М.: Радио и связь, 1990).
- Urban W. *Infrared Phys. Technol.*, **36**, 465 (1995).
- Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Сучков А.Ф. *Квантовая электроника*, **3**, 121 (1971).
- Басов Н.Г., Беленов Э.М., Данилычев В.А., Сучков А.Ф. *Письма в ЖЭТФ*, **14**, 545 (1971).
- Klosterman E.L., Byron S.R. *J. Appl. Phys.*, **50**, 5168 (1979).
- Mayerhofer W., Henning W., Novack R., Hugel H. *Proc. 6th Int. Symp. Gas Flow and Chem. Lasers* (Berlin, 1987, p. 237).
- Горшков И.И., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *Кр. сообщ. физ.*, № 5, 31 (1989).
- Ionin A.A., Kotkov A.A., Minkovsky M.G., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1397**, 453 (1990).
- Dymshits V.M., Ivanov G.V., Mescherskiy A.N., Kovsh I.B. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2206**, 109 (1994).
- Бородин А.М., Гурашвили В.А., Кузьмин В.Н. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 315 (1996).
- Бон В., фон Булов Х., Дасс Ш., Ионин А.А. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 1126 (2005).
- Bohn W., von Buolow H., Dass S., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6263**, 626303 (2006).
- Mann M.M. *AIAA J.*, **14**, 549 (1976).
- Ионин А.А. В кн. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы*. Под ред. С.И. Яковленко (М.: Физматлит, 2005, сер. Б, т. XI-4, с. 740).
- Ionin A.A., in *Gas Lasers* (Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, London, New York, 2007, p. 201).
- Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 111 (2007).
- Mann M.M., Rice D.K., Eguchi R.G. *IEEE J. Quantum Electron.*, **10**, 682 (1974).
- Басов Н.Г., Бакаев В.Г., Ионин А.А. и др. *ЖТФ*, **55**, 326 (1985).
- Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 771 (2000).
- Basov N.G., Hager G.D., Ionin A.A., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 810 (2000).
- Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **36**, 1153 (2006).
- Djeu N. *Appl. Phys. Lett.*, **23**, 309 (1973).
- Yardley J.T. *J. Molec. Spectr.*, **35**, 314 (1970).
- Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 859 (2000).
- Ionin A.A., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **36**, 982 (2003).
- Ионин А.А., Климачев Ю.М., Кочетов И.В. и др. Патент РФ № 2206495 от 20.06.2003. *Бюлл. изобрет.*, № 17, 658 (2003).
- Вагин Н.П., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Квантовая электроника*, **34**, 865 (2004).
- Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. В сб. *Научная сессия МИФИ-2005* (М.: изд-во МИФИ, 2005, т. 4, с. 26).
- Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 231 (2007).
- Ionin A.A., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6611**, 66110H (2007).
- Ionin A.A., Klimachev Y.M., Kotkov A.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6346**, 63463D (2007).
- Басов Н.Г., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Квантовая электроника*, **32**, 404 (2002).
- Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 1107 (2005).
- Ветошкин С.В., Ионин А.А., Климачев Ю.М. и др. *Препринт ФИАН № 13* (М., 2005); Vetoshkin S.V., Ionin A.A., Klimachev Yu.M., et al. *J. Rus. Laser Res.*, **27**, 33 (2006).
- Елкин Н.Н., Кочетов И.В., Курносоев А.К., Напартович А.П. *Квантовая электроника*, **17**, 313 (1990).
- Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю. и др. *Препринт ФИАН № 16* (М., 2007).
- Klimachev Y.M., Ionin A.A., Kotkov A.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6735**, 67350H (2007).
- Лондер Я.И., Менахин Л.П., Ульянов К.Н. *ТВТ*, **19**, 720 (1981).
- Schulz G.J. *Phys. Rev.*, **135**, 988 (1964).
- Rich J.W. *J. Appl. Phys.*, **42**, 2719 (1971).
- Соболев Н.Н., Соколов В.В. *УФН*, **110**, 191 (1973).
- Treanor C.E., Rich J.W., Rehm R.G. *J. Chem. Phys.*, **48**, 1798 (1968).
- Гордиев Б.Ф., Осипов А.И., Шелепин Л.А. *Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры* (М.: Наука, 1980).
- Plönjes E., Palm P., Lee W., et al. *Chem. Phys.*, **260**, 353 (2000).
- Елецкий А.В., Палкина Л.А., Смирнов Б.М. *Явления переноса в слабоионизированной плазме* (М.: Атомиздат, 1975).
- Ionin A.A., Seleznev L.V., Shelestovich A.V., Sinitsyn D.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6346**, 634605 (2007).
- Ionin A.A., Seleznev L.V., Shelestovich A.V., Sinitsyn D.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6454**, 645406 (2007).