

Криогенный щелевой лазер на окиси углерода

А.А.Ионин, А.Ю.Козлов, Л.В.Селезнев, Д.В.Синицын

Создан компактный щелевой СО-лазер с накачкой емкостным поперечным ВЧ разрядом и криогенным охлаждением электродов, действующий как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом (ИП) режиме. Проведено параметрическое исследование лазера, работающего в режиме свободной многочастотной генерации на колебательно-вращательных переходах основных колебательных полос ($V+1 \rightarrow V$) молекулы СО в спектральном диапазоне 5.1–5.4 мкм. Определены оптимальные условия его работы (состав и давление газовой смеси, параметры ВЧ накачки). Показано, что только смеси с высоким содержанием кислорода (до 20 % по отношению к концентрации молекул СО) являются пригодными для использования в качестве активной среды такого лазера. Продемонстрирована большая эффективность ИП накачки по сравнению с непрерывной, причем генерация излучения может протекать при этом в квазинепрерывном режиме. Максимальная полученная в экспериментах средняя мощность излучения лазера, действующего на основных полосах, составила ~ 12 Вт, а его КПД достигал ~ 14 %. Реализован частотно-селективный режим генерации в щелевом СО-лазере с ВЧ возбуждением примерно на 100 лазерных линиях в спектральном диапазоне 5.0–6.5 мкм со средней выходной мощностью до нескольких десятков милливольт в каждой линии. Получена генерация излучения на переходах первого колебательного обертона ($V+2 \rightarrow V$) молекулы СО в спектральном диапазоне 2.5–3.9 мкм. Средняя мощность лазера, действующего на обертоновых переходах, достигала 0.3 Вт. Все результаты были получены без принудительной замены газовой смеси в разрядной камере. При фиксированных экспериментальных условиях стабильная импульсно-периодическая генерация (с флуктуациями выходных характеристик не более ± 10 %) была реализована на временном промежутке свыше одного часа.

Ключевые слова: СО-лазер, ВЧ разряд, щелевая (планарная) геометрия, колебательно-вращательные переходы, основная полоса, обертоновая полоса, импульсно-периодический режим.

1. Введение

Лазер на окиси углерода, действующий на колебательно-вращательных переходах основных колебательных полос ($V+1 \rightarrow V$) молекулы СО ($\lambda \sim 4.9 - 7.5$ мкм), является источником лазерного излучения в среднем ИК диапазоне, удобным для решения различных фундаментальных и прикладных задач. При создании специальных условий такой лазер может работать также и на обертоновых переходах ($V+2 \rightarrow V$) молекулы СО ($\lambda \sim 2.5 - 4.2$ мкм) (см., напр., обзоры [1, 2]). Спектр генерации СО-лазера (суммарно на основных и обертоновых переходах) может состоять из более чем 1000 спектральных линий [3, 4]. При этом он перекрывает спектральные диапазоны, где располагаются линии поглощения не только обычных веществ (H_2O , CO_2 , CH_4 , NO_2 , NO , ацетон, бензин, метанол и др.), но и сильных загрязнителей атмосферы, токсинов, взрывчатых и наркотических веществ, надежное детектирование которых является сегодня весьма актуальной задачей. Кроме того, излучение СО-лазера, действующего на обертоновых переходах, перекрывает довольно широкое окно прозрачности атмосферы (3.3–4.0 мкм) [5]. Оценки, проведенные в работе [6], показывают, что СО-лазер является одним из лучших кандидатов для

решения задач количественного и качественного лазерного спектроскопического анализа многокомпонентных газовых смесей, содержащих малые примеси вышеуказанных веществ.

В последнее время достигнут значительный прогресс в разработке капиллярных и щелевых газовых лазеров (в том числе проточных и отпаянных CO_2 - и СО-лазеров) с диффузионным охлаждением, возбуждаемых емкостным поперечным высокочастотным (ВЧ) разрядом (см., напр., [7–16]). В этих лазерах отвод тепла из газовой смеси производится через охлаждаемые электроды, к которым прикладывается возбуждающее ВЧ напряжение. ВЧ разряд обладает рядом преимуществ по сравнению с наиболее простым и часто используемым разрядом постоянного тока (РПТ). К ним, прежде всего, относятся меньшее напряжение источников питания, более высокая энергетическая эффективность, а также простота модуляции и управления выходной мощностью лазеров. Кроме того, ВЧ разряд позволяет возбуждать достаточно большие объемы активной среды (в планарной геометрии) при давлениях в несколько десятков торр без использования источников внешней ионизации. По сравнению с РПТ, ВЧ разряд оказывается более устойчивым.

Известно, что СО-лазер имеет наилучшие выходные характеристики при криогенных температурах активной газовой смеси. Низкая температура активной среды особенно важна для эффективной работы обертонового СО-лазера. Однако до настоящего времени СО-лазеры с ВЧ накачкой исследовались по большей части при комнатной или немного пониженной (до $-20 \div -30$ °С) темпе-

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

Поступила в редакцию 5 февраля 2008 г., после доработки – 9 февраля 2009 г.

ратуре [7–9, 11, 17] активной среды в режиме генерации на переходах основных полос. Исключение составляют лишь несколько работ, в которых для реализации обертоновой генерации в СО-лазере с ВЧ возбуждением использовалось криогенное диффузионное охлаждение активной среды щелевого СО-лазера на основных переходах (см., напр., [13]) или охлаждение в сверхзвуковом потоке газа (см., напр., [18, 19]). Поэтому практически важной задачей является создание компактного щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением и диффузионным охлаждением его активной среды до низких температур. Такой лазер, сочетающий в себе относительную простоту и компактность, присущие щелевым лазерам с ВЧ возбуждением, а также высокую эффективность и широкий спектр генерации, характерные для электроразрядных СО-лазеров, может стать уникальным спектроскопическим инструментом для детектирования различных взрывчатых, ядовитых и других опасных веществ и материалов. Поэтому данная работа посвящена созданию щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением и криогенным диффузионным охлаждением активной среды, действующего на основных ($V + 1 \rightarrow V$) переходах, и исследованию его генерационных характеристик с целью получения генерации излучения на обертоновых ($V + 2 \rightarrow V$) переходах.

2. Экспериментальная установка

Эксперименты по исследованию характеристик криогенного щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением проводились на специально разработанной и изготовленной установке, подробно описанной в работе [20]. Разрядная камера была изготовлена из нержавеющей стали и имела внутренний объем ~ 8 л. Электродная система установки состояла из двух пустотелых латунных электродов, через которые непрерывно прокачивался жидкий азот, благодаря чему электроды могли охлаждаться до температуры ~ 120 К. В экспериментах использовались две электродные системы (А и Б) различной конфигурации. В обеих системах длина электродов вдоль оси лазерного резонатора составляла 250 мм, а высота вертикально расположенного разрядного промежутка была равна 16 мм (система А) и 30 мм (система Б). Расстояние между электродами в обеих системах составляло 3 мм.

Для возбуждения разряда использовался высокочастотный генератор RFPS-500АМ с максимальной выходной мощностью в непрерывном режиме $P_{RF}^{max} = 620$ Вт, который подключался к разрядной камере через регулируемую Т-образную LC-систему согласования. Рабочая частота ВЧ генератора F составляла 81.36 МГц. Генератор мог также работать в импульсно-периодическом режиме с низкочастотной амплитудной модуляцией выходной ВЧ мощности (частота модуляции $F_{mod} = 0.1 - 25$ кГц). Средняя ВЧ мощность (P_{RF}), подводимая к разрядному промежутку, могла изменяться варьированием как длительности t модулирующих импульсов в диапазоне $t = (0.01 - 1)T_{mod}$ ($T_{mod} = 1/F_{mod}$ – период модуляции), так и мгновенной ВЧ мощности $P_{RF} = (0.25 - 1.0)P_{RF}^{max}$ в каждом импульсе. Информация о параметрах накачки и о том, каким из указанных способов они изменялись, будет приведена ниже для каждой серии экспериментов.

Следует отметить, что работа электроразрядных СО-лазеров при криогенных температурах кислородсодержащей плазмы активной среды (кислород обычно добавляется в активную газовую смесь для компенсации дис-

социации СО в разряде), как правило, сопровождается образованием в ней озона, который конденсируется и оседает в жидком виде на криогенных элементах конструкции лазера. Жидкий озон представляет собой сильное взрывчатое вещество, которое может приводить и иногда приводит к разрушению экспериментальных криогенных электроразрядных установок на основе газовых смесей, содержащих окись углерода и/или кислород [21–23]. Для предотвращения таких ситуаций нарабатываемый жидкий озон необходимо непрерывно удалять из электроразрядной камеры. По этой причине криогенные СО-лазеры, как правило, должны работать при непрерывной прокачке газа, которую необходимо поддерживать длительное время даже после выключения разряда. Используемая в настоящей работе конструкция компактного криогенного щелевого СО-лазера с ВЧ накачкой позволяет, благодаря вертикальному расположению разрядного промежутка, удалять жидкий озон из области ВЧ разряда действием силы тяжести и обеспечивает его нагрев и газификацию в буферном объеме камеры, имеющем комнатную температуру.

3. Экспериментальные результаты

3.1. Основные колебательные переходы молекулы СО

Для нахождения оптимальных условий работы криогенного щелевого СО-лазера с ВЧ накачкой, при которых реализуется максимальная выходная мощность и/или КПД, были проведены серии экспериментов. В этих экспериментах изменялись параметры активной среды лазера (состав газовой смеси, ее давление) или условия накачки (мощность и режим возбуждения, частота модуляции). Лазерный резонатор длиной 270 мм был образован глухим (кварц с напыленным алюминием) сферическим ($R_{сгв} = 1500$ мм) зеркалом и плоским выходным зеркалом (пластина из CaF_2 с диэлектрическим покрытием) с коэффициентом отражения $85\% \pm 5\%$ в диапазоне длин волн 4.9–7.1 мкм.

Выходные характеристики электроразрядных СО-лазеров зависят от состава газовой смеси и ее давления. В газовых смесях обычно присутствуют азот и кислород в различных пропорциях. В наших экспериментах в качестве добавок к газовой смеси СО–Не был использован воздух (соотношение концентраций азота и кислорода в нем составляло 4 : 1). В отпаянных СО-лазерах, работающих при комнатной [17] или слегка пониженной [8, 9] температурах, обычно используются газовые смеси с небольшим содержанием кислорода, $CO : O_2 : M = 1 : (0.03 - 0.05) : Y$ (M – остальные компоненты смеси, Y – их суммарное содержание). Однако применение таких смесей в наших экспериментах приводило к интенсивному образованию углеродной пленки на рабочих поверхностях охлаждаемых электродов, что существенно меняло структуру ВЧ разряда (нарушалось однородное распределение разрядного тока по площади рабочих поверхностей электродов). В результате после непродолжительной (в течение нескольких минут) работы выходная мощность щелевого СО-лазера существенно (в 4–5 раз) уменьшалась. По этой причине только смеси с высоким содержанием кислорода (до 20 % по отношению к концентрации молекул СО) оказались пригодными для использования в качестве активной среды щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением и криогенным охлаждением электродной системы. Также была проведена оптимизация лазерных ха-

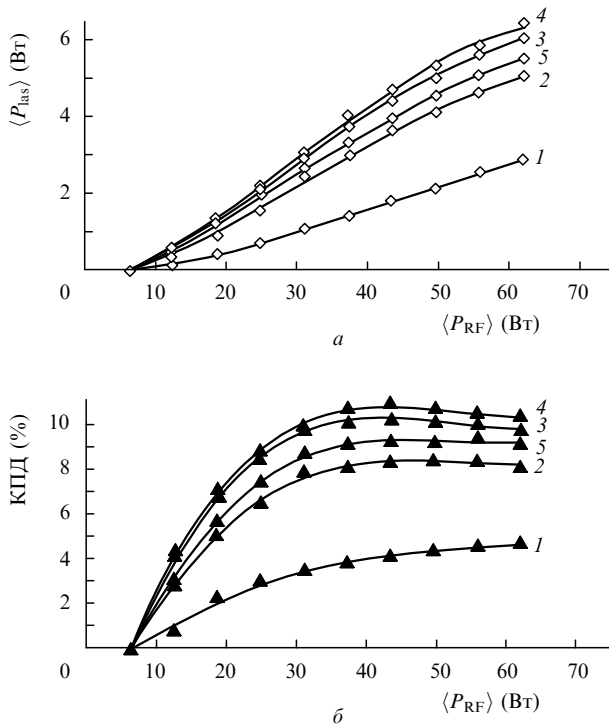


Рис.1. Зависимости средней выходной мощности щелевого СО-лазера с ВЧ накачкой (а) и его эффективности (б) от средней мощности ВЧ возбуждения (электродная система А) для смеси СО : воздух : Не = 1 : 1 : 10 при $F_{\text{mod}} = 500$ Гц, $P_{\text{RF}} = 620$ Вт и давлении активной среды 11 (1), 18.5 (2), 30 (3), 37.5 (4) и 45 Тор (5).

рактических по содержанию гелия в трехкомпонентной газовой смеси СО : воздух : Не = 1 : 1 : X. Эксперименты показали, что в щелевом СО-лазере с ВЧ возбуждением в качестве активной среды предпочтительнее использовать газовые смеси с относительно высоким (70 % – 90 %) содержанием Не.

Экспериментально было найдено оптимальное давление газовой смеси (рис.1). Максимальный КПД щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением, достигнутый в экспериментах с электродной системой А, был получен при давлении газовой смеси 37.5 Тор и составил ~11 % (смесь СО : воздух : Не = 1 : 1 : 10). В данных экспериментах импульсное значение вкладываемой ВЧ мощности было постоянным, а средняя вкладываемая мощность варьировалась при изменении длительности t импульсов модуляции.

Для дальнейшего параметрического исследования СО-лазера с ВЧ возбуждением было необходимо определить оптимальную частоту модуляции ВЧ мощности накачки. В этой серии экспериментов (рис.2) состав газовой смеси и ее давление были фиксированы (СО : воздух : Не = 1 : 1 : 10; 37 Тор). При постоянной средней мощности ВЧ возбуждения $\langle P_{\text{RF}} \rangle = 62$ Вт (длительность модулирующих импульсов составляла 10 % от периода модуляции) и увеличении F_{mod} наблюдалось небольшое уменьшение средней мощности излучения $\langle P_{\text{las}} \rangle$ и КПД СО-лазера. В дальнейших экспериментах частота модуляции составляла 100 – 1000 Гц, что соответствовало наибольшим значениям мощности излучения и КПД СО-лазера (рис.2).

Средняя мощность ВЧ возбуждения в следующей серии экспериментов увеличивалась путем увеличения длительности t импульса ВЧ возбуждения (при постоянной F_{mod}) с переходом в итоге к непрерывному режиму накачки. Был определен верхний предел средней мощности

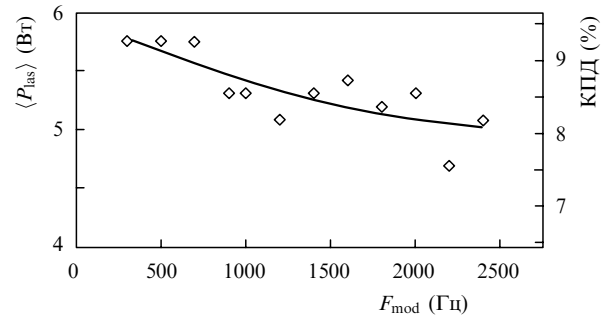


Рис.2. Зависимости средней выходной мощности $\langle P_{\text{las}} \rangle$ и КПД щелевого СО-лазера от частоты модуляции ВЧ мощности возбуждения (электродная система А) для газовой смеси СО : воздух : Не = 1 : 1 : 10 при давлении 37 Тор и $\langle P_{\text{RF}} \rangle = 62$ Вт.

ВЧ возбуждения, с превышением которого при нагреве газовой смеси в разрядной области начинали существенно уменьшаться выходная мощность щелевого СО-лазера и его КПД (рис.3). В этих экспериментах ВЧ возбуждение осуществлялось при $F_{\text{mod}} = 1000$ Гц и пиковой мощности ВЧ импульса $P_{\text{RF}} = 400$ Вт. Средняя мощность ВЧ возбуждения $\langle P_{\text{RF}} \rangle$ изменялась от 40 до 280 Вт. Крайняя правая точка на рис.3 соответствует непрерывному режиму работы ВЧ генератора.

При увеличении средней мощности ВЧ возбуждения от ~40 до ~150 Вт средняя выходная мощность СО-лазера возрастала и достигала своего максимального значения (~12 Вт). В этом диапазоне $\langle P_{\text{RF}} \rangle$ КПД щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением оставался примерно на одном уровне и составлял 8 % – 9 % (рис.3). Дальнейшее увеличение $\langle P_{\text{RF}} \rangle$ приводило к резкому падению и выходной мощности СО-лазера, и его КПД. Видимо, в данных условиях жидкий азот активно вскипал внутри электродов, и между внутренней поверхностью электрода и жидким азотом появлялся слой пара с низкой теплопроводностью, который препятствовал отводу тепла из зоны ВЧ разряда. Для более эффективного отвода тепла следовало увеличить скорость прокачки через электроды жидкого азота, что и было учтено при конструировании электродной системы Б.

Аналогичные описанным выше серии экспериментов были проведены с электродной системой Б с увеличенной до 30 мм высотой разрядной щели и с ускоренной (под давлением) прокачкой жидкого азота через внутренние полости электродов. На рис.4 представлены энергетические характеристики щелевого СО-лазера, оснащенного различными электродными системами, в оптимальных

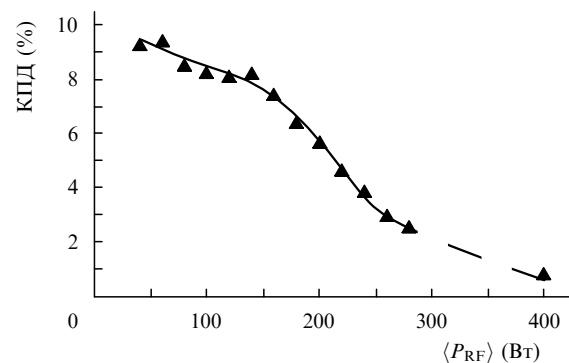


Рис.3. Зависимость КПД щелевого СО-лазера от средней мощности ВЧ возбуждения (электродная система А) для газовой смеси СО : воздух : Не = 1 : 1 : 5 при давлении 26 Тор, $F_{\text{mod}} = 1000$ Гц, $P_{\text{RF}} = 400$ Вт.

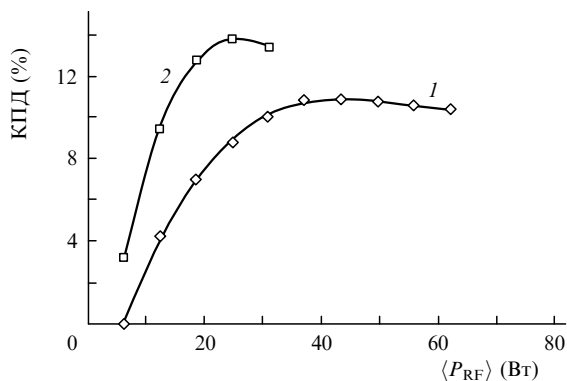


Рис.4. Зависимости КПД щелевого СО-лазера от средней мощности ВЧ возбуждения для электродных систем А (высота электродов 16 мм, 1) и Б (30 мм, 2). Газовая смесь СО : воздух : Не = 1 : 1 : 10.

для каждой системы условиях накачки. Максимальный КПД был получен для электродной системы Б и достигал 14 %. По этой причине все дальнейшие эксперименты выполнялись с этой электродной системой.

Спектр излучения щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением находился в диапазоне длин волн 5.1 – 5.4 мкм и сильно зависел от условий экспериментов. Для примера на рис.5 приведен один из полученных спектров. Следует отметить, что спектр в этих экспериментах регистрировался с недостаточной чувствительностью, в связи с чем число лазерных линий, на которых происходила генерация, могло быть гораздо больше, чем представлено на рис.5.

В экспериментах был реализован также частотно-селективный режим генерации излучения криогенного щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением. Лазерный резонатор состоял из глухого (кварцевая подложка с напыленным алюминием) вогнутого зеркала с радиусом кривизны 1 м и дифракционной решетки 210 штр./мм с выводом излучения в нулевой порядок дифракции. При фиксированных экспериментальных условиях (лазерная смесь СО : воздух : Не = 1 : 1 : 10, давление 22 Тор, режим на-

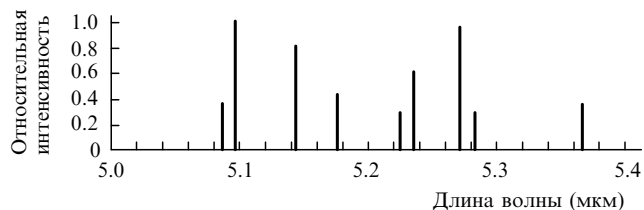


Рис.5. Типичный спектр генерации щелевого СО-лазера с ВЧ возбуждением. Газовая смесь СО : воздух : Не = 1 : 1 : 10, давление 30 Тор, $F_{mod} = 500$ Гц.

качки – ВЧ импульсы длительностью 0.1 мс с частотой следования 500 Гц и пиковой ВЧ мощностью 620 Вт) одночастотный режим генерации лазера был реализован на ~100 лазерных линиях в спектральном диапазоне 4.98 – 6.26 мкм. Средняя выходная мощность составляла от нескольких единиц до нескольких десятков милливатт в каждой линии. Небольшое увеличение средней мощности ВЧ возбуждения путем увеличения длительности импульса накачки до 0.14 мс приводило к расширению спектра генерации лазера в длинноволновую область вплоть до ~6.5 мкм.

Типичные осциллограммы интенсивности выходного излучения щелевого СО-лазера с импульсно-периодическим ВЧ возбуждением, работающего в многочастотном режиме свободной генерации, представлены на рис.6. Возбуждение активной среды осуществлялось импульсами, следующими с частотой $F_{mod} = 100$ Гц и имеющими разную длительность t . Эксперименты показали, что в наших условиях уже при длительности импульса накачки $t \sim 400$ мкс (рис.6,б) интенсивность излучения начинает спадать еще до его окончания вследствие перегрева газовой смеси. При $t \sim 600$ мкс это наблюдалось более явно (рис.6,в). В целом необходимо отметить, что в зависимости от режима ВЧ возбуждения (частоты модуляции, скважности и длительности импульсов) СО-лазер может работать как в импульсно-периодическом (короткие импульсы с большой скважностью), так и в квазипрерывном режиме, когда каждый последующий импульс ВЧ накачки накладывается на предыдущий, еще не закончившийся импульс генерации.

В экспериментах была проведена контрольная серия измерений средней выходной мощности щелевого СО-лазера на большом временном промежутке при неизменных условиях накачки (частота следования лазерных импульсов 100 Гц, средняя выходная мощность лазера ~1.5 Вт). В течение более чем одного часа работы лазера без обновления рабочей смеси флуктуации средней выходной мощности не превышали ~10 %. Следует отметить, что общее количество циклов ВЧ накачки (и, соответственно, лазерных импульсов), при котором не наблюдалось существенной деградации лазерной газовой смеси и падения выходных лазерных характеристик, достигает $(3 - 5) \times 10^5$. При этом, в зависимости от конкретной задачи, для решения которой можно использовать исследуемый СО-лазер, частота следования лазерных импульсов может быть изменена в широких пределах – от единиц герц до нескольких килогерц, а время стабильной непрерывной работы (при минимальных частотах) может быть увеличено многократно.

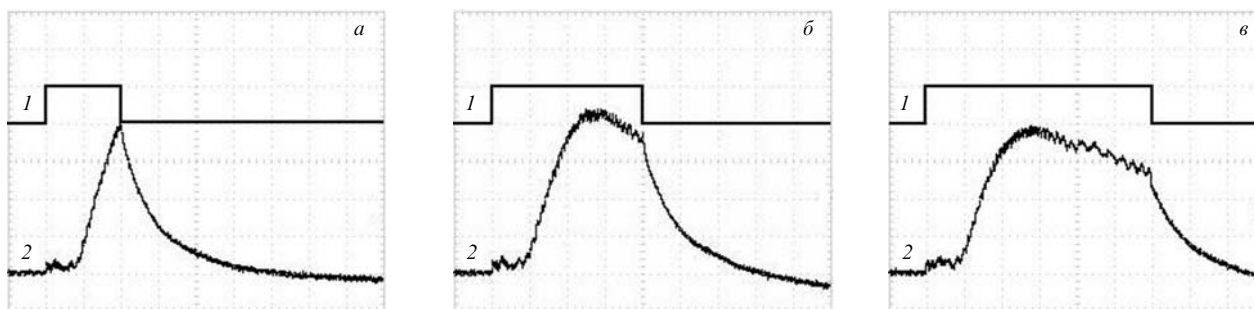


Рис.6. Осциллограммы огибающей импульса ВЧ накачки (1) и импульсов лазерного излучения (2) в случае фиксированной частоты модуляции ($F_{mod} = 100$ Гц) для смеси СО : воздух : Не = 1 : 1 : 10 при давлении 26 Тор и длительностях импульсов ВЧ накачки $t = 200$ (а), 400 (б) и 600 мкс (в); развертка 100 мкс/дел.

3.2. Обертонные колебательные переходы молекулы CO

Основываясь на полученных результатах и на опыте работы с другими типами электроразрядных CO-лазеров [3, 4, 24], мы провели эксперименты с целью получения генерации излучения на обертонных ($V + 2 \rightarrow V$) переходах молекулы CO в щелевом лазере с ВЧ возбуждением.

Учитывая относительно небольшую длину активной среды в щелевом CO-лазере (25 см) и существенно более низкий ожидаемый коэффициент усиления на обертонных переходах по сравнению с основными переходами [2], в экспериментах использовали устойчивый лазерный резонатор с интерференционными высокоотражающими зеркалами. Нужно отметить, что вследствие очень высокого коэффициента отражения (более 99 %) в области 2.5–4.0 мкм, и малого коэффициента в спектральной области $\lambda > 5$ мкм обеспечивалось подавление генерации на основных переходах, что важно для реализации эффективной «обертонной» генерации [2, 3].

Для регистрации спектрально-энергетических параметров лазера была использована следующая оптическая схема. Излучение лазера проходило через плоскую пластину из ИК кварца толщиной 20 мм, которая полностью поглощала излучение с длинами волн, превышающими 4 мкм, для отсека люминесценции и генерации (если таковая возникла) на основных переходах молекулы CO. Далее, после прохождения через светоделительную пластину из CaF₂, излучение поступало в дифракционный монохроматор. Мощность генерации, сосредоточенная в отдельных линиях, измерялась на выходе монохроматора. Абсолютная калибровка спектрально-энергетического распределения лазерной мощности проводилась по второму измерителю мощности, который измерял энергию, отраженную светоделительной пластиной.

В экспериментах использовались два набора зеркал резонатора с различными спектральными характеристиками. При неизменном заднем зеркале, спектральные характеристики которого представлены на рис.7, спектр генерации лазера определялся спектральными свойствами выходных зеркал. На рис.8 представлены спектры пропускания выходных зеркал и соответствующие им типичные измеренные распределения мощности генерации по спектральным линиям обертонного щелевого CO-лазера с импульсно-периодическим ВЧ возбуждением в режиме неселективной свободной генерации. Суммарный (по двум наборам зеркал резонатора) выходной спектр лазера состоял из ~ 90 линий колебательных пе-

реходов $V + 2 \rightarrow V$ (от $8 \rightarrow 6$ до $36 \rightarrow 34$) и охватывал спектральный диапазон 2.55–3.9 мкм. Средняя выходная мощность обертонного CO-лазера с выходным зеркалом, спектр пропускания которого представлен на рис.8,а, достигала ~ 0.3 Вт при КПД около 0.5 % (суммарно по всем линиям генерации), а максимальная мощность в отдельной линии при этом составляла ~ 12 мВт. Максимальная достигнутая в экспериментах средняя выходная мощность обертонного CO-лазера с другим выходным зеркалом (рис.8,б) была несколько меньше (~ 90 мВт суммарно по всем линиям генерации). Уменьшение выходной мощности связано, по-видимому, с менее оптимальными параметрами резонатора, что сильно влияет на эффективность работы лазера с учетом невысоких значений коэффициента усиления на обертонных переходах молекулы CO.

4. Заключение

Создан компактный щелевой CO-лазер с накачкой как импульсно-периодическим, так и непрерывным емкостным ВЧ разрядом и с криогенным охлаждением электродов. Показано, что только смеси с высоким содержанием кислорода (до 20 % по отношению к концентрации молекул CO) пригодны для использования в качестве активной среды такого лазера. Проведено параметрическое исследование этого лазера, работающего на колебательно-вращательных переходах основных колебательных полос ($V + 1 \rightarrow V$) молекулы CO. Определены оптимальные условия его работы (состав и давление газовой смеси, параметры ВЧ накачки) в режиме свободной многочастотной генерации. Продемонстрировано, что импульсно-периодическая накачка более эффективна, чем непрерывная, причем генерация излучения может протекать при этом в квазинепрерывном режиме. Спектр излучения находился в диапазоне 5.1–5.4 мкм. Максимальная полученная в экспериментах средняя мощность лазера составила ~ 12 Вт, а его КПД достигал ~ 14 %.

Реализован частотно-селективный режим генерации щелевого CO-лазера с ВЧ возбуждением на ~ 100 лазерных линиях в спектральном диапазоне 5.0–6.5 мкм. Средняя выходная мощность CO-лазера в этом режиме составляла от нескольких единиц до нескольких десятков милливольт в каждой линии.

Все результаты были получены без принудительной замены газовой смеси. При фиксированных экспериментальных условиях стабильная генерация (с флуктуация-

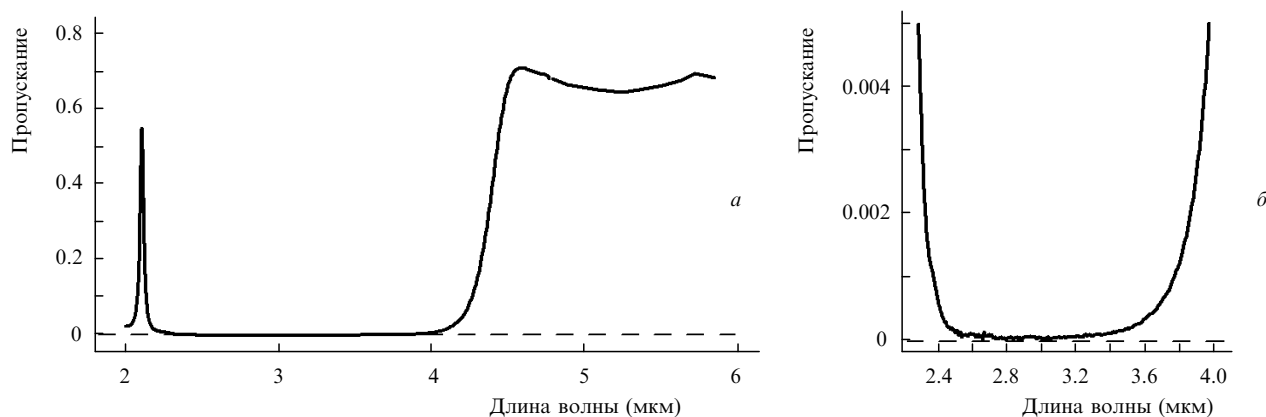


Рис.7. Полная спектральная характеристика (а) и ее участок вблизи минимума пропускания (б) заднего глухого сферического зеркала с радиусом кривизны 2000 мм (подложка из кремния с диэлектрическим покрытием).

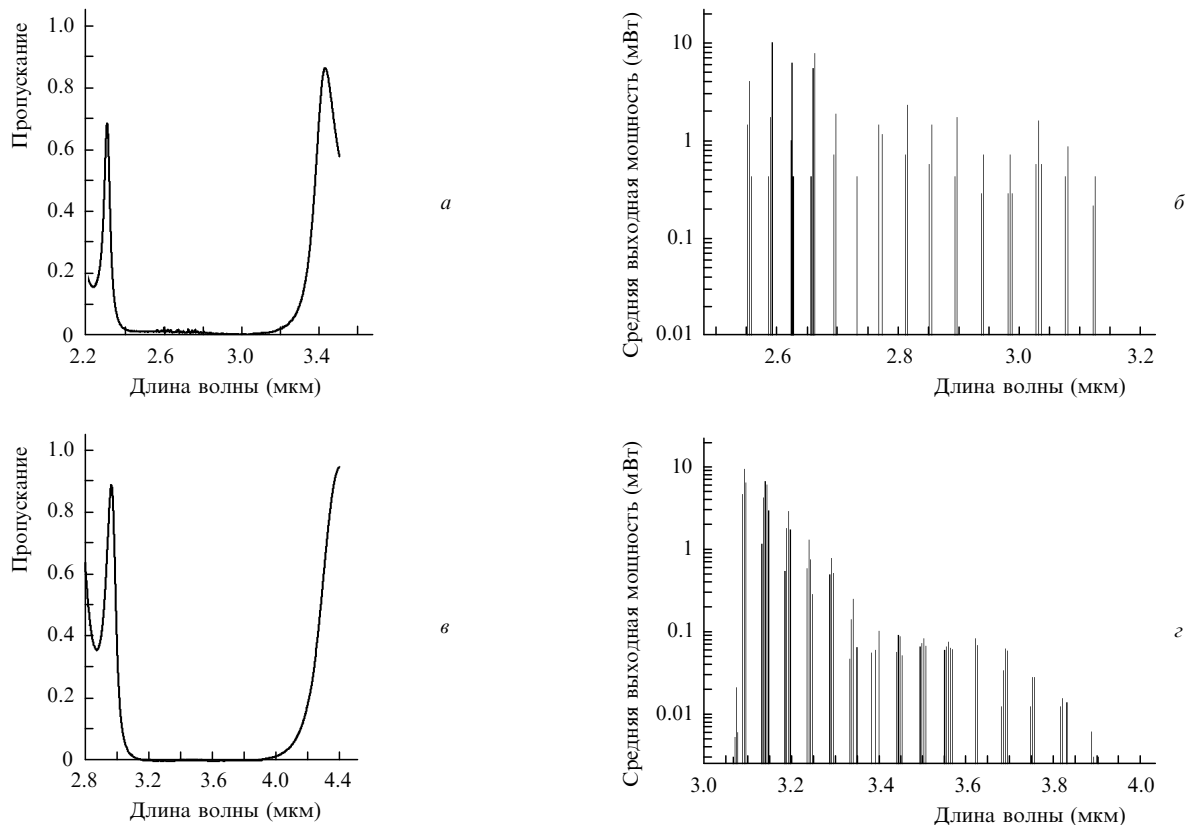


Рис.8. Спектры пропускания выходных плоских зеркал (а, в) и соответствующие им спектры свободной многочастотной генерации обертонового щелевого СО-лазера с импульсно-периодической ВЧ накачкой (б, г).

ми выходных характеристик не более $\pm 10\%$) была реализована на временном промежутке более одного часа, что соответствует количеству лазерных импульсов $(3 - 5) \times 10^5$.

Впервые осуществлена работа щелевого ВЧ СО-лазера на обертонных колебательно-вращательных переходах ($V + 2 \rightarrow V$) молекулы СО в спектральном диапазоне 2.5–3.9 мкм со средней выходной мощностью до 300 мВт.

Такой лазер, сочетающий в себе относительную простоту и компактность, присущие щелевым ВЧ конструкциям, а также высокую эффективность и широкий спектр генерации, характерные для электроразрядных СО-лазеров, может стать уникальным спектроскопическим инструментом для детектирования различных взрывчатых, ядовитых и других опасных веществ и материалов.

Работа поддержана РФФИ (гранты № 06-02-08041 и 07-05-00765) и Программой поддержки молодежи Учебно-научного комплекса ФИАН. Авторы выражают признательность Ю.В.Терехову и А.В.Шелестовичу за помощь в проведении экспериментов, А.А.Коткову, Ю.М.Климачеву и О.А.Рулеву за помощь в подготовке экспериментов и обсуждение результатов, а также А.П.Минееву за полезные консультации.

1. Ионин А.А. В кн. «Энциклопедия низкотемпературной плазмы». Под ред. В.Е.Фортова, (М.: Физматлит, 2005, сер.Б, т.ХІ-4, с. 740).
2. Ionin A.A., in «Gas Lasers». Ed. by M.Endo, R.Walter (Boca Raton, Florida, USA: CRC Press-Taylor and Francis Group, 2007, p. 201).
3. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 771 (2000).

4. Басов Н.Г., Ионин А.А., Котков А.А. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 859 (2000).
5. Межерис Р. М. *Лазерное зондирование атмосферы* (М.: Мир, 1987).
6. Buzykin O.G., Ionin A.A., Ivanov S.V., et al. *Laser Part. Beams*, **18**, 697 (2000).
7. Pearson G.N., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 1222 (1987).
8. Zhao H., Baker H.J., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 1281 (1991).
9. Colley A.D., Villarreal F., Baker H.J., Hall D.R. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2916 (1994).
10. Colley A.D., Villarreal F., Cameron A.A., et al., in *Gas Laser – Recent Developments and Future Prospects* (NATO ASI Ser. 3: High Technology) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1995, vol. 10, p. 89).
11. Hall D.R., Baker H.J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2502**, 12 (1995).
12. Веснов И.Г., Мольков С.И., Степанов В.А., Шишканов Е.Ф. *Квантовая электроника*, **27**, 55 (1999).
13. Jianguo X., Wang Z., Wentao J. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1369 (1999).
14. Дутов А.И., Евстратов И.Ю., Иванова В.Н. и др. *Квантовая электроника*, **23**, 499 (1996).
15. Plinski E.F., Witkovski J.S., Abramski K.M. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 1823 (2000).
16. Cherezov V.M., Kyun V.V., Ochkin V.N., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4644**, 275 (2002).
17. Uehara M., Kanazawa H., Kasuya K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2502**, 38 (1995).
18. Бон В., фон Булов Х., Дасс Ш., Ионин А.А. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 1126 (2005).
19. Von Bulow H., Zeifang E. *Rev. Sci. Instr.*, **64**, 1764 (1993).
20. Ионин А.А., Козлов А.Ю., Селезнев Л.В., Синицын Д.В. *Препринт ФИАН № 1*, (М., 2008).
21. Urban W. *Infrared Phys. Technol.*, **36**, 465 (1995).
22. Reilly J. *Private communication*.
23. Solomon W., Carroll D. *Private communication*.
24. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю. и др. *Квантовая электроника*, **36**, 1153 (2006).