

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Физический
ИНСТИТУТ
имени
П.Н.Лебедева



Ф

И

А

Н

ПРЕПРИНТ

1

А.А. ИОНИН, А.Ю. КОЗЛОВ,
Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, Д.В. СИНИЦЫН

**КОМПАКТНЫЙ КРИОГЕННЫЙ
ЩЕЛЕВОЙ СО-ЛАЗЕР
С НАКАЧКОЙ ЕМКОСТНЫМ
ВЧ-РАЗРЯДОМ**

МОСКВА 2008

COMPACT CRYOGENIC SLAB CO-LASER WITH CAPACITIVE RF-DISCHARGE EXCITATION

A.A.Ionin, A.Yu.Kozlov, L.V.Seleznev, D.V.Sinitsyn

Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences

53, Leninsky prosp., Moscow 119991, Russia

ABSTRACT

A compact slab CO laser excited by repetitively pulsed capacitive RF discharge with cryogenically cooled electrodes was developed. Parametric study of the laser operating on fundamental vibrational-rotational transitions ($V \rightarrow V-1$) of CO molecule was carried out. Optimal operation conditions (gas mixture content and pressure, RF pumping parameters) were found for free running mode of operation. Maximal averaged CO laser output power of ~ 12 W was obtained in the experiments, with the laser efficiency coming up to $\sim 14\%$. Frequency selective lasing was for the first time observed for cryogenic slab CO laser with RF discharge excitation. Single line operation with averaged output power up to several tens of milliwatts was obtained on ~ 100 laser transitions in spectral interval $4.9\text{--}6.5\text{ }\mu\text{m}$. Slab RF CO laser free running operation on overtone vibrational-rotational transitions ($V \rightarrow V-2$) of CO molecule was for the first time demonstrated, with averaged output power up to 0.3 W in spectral range of $2.5\text{--}3.1\text{ }\mu\text{m}$. All experimental results were obtained without forced gas mixture exchange inside the discharge chamber. Under fixed experimental conditions stable lasing (with fluctuations of output characteristics no more than $\pm 10\%$) was obtained for more than one hour. This fact enables us to claim that sealed-off mode of operation was for the first time developed for slab cryogenic CO laser with RF excitation.

КОМПАКТНЫЙ КРИОГЕННЫЙ ЩЕЛЕВОЙ СО-ЛАЗЕР С НАКАЧКОЙ ЕМКОСТНЫМ ВЧ-РАЗРЯДОМ

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

Физический Институт им. П.Н.Лебедева РАН

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 53

АННОТАЦИЯ

Создан компактный щелевой СО лазер с накачкой импульсно-периодическим емкостным ВЧ разрядом и криогенным охлаждением электродов. Проведено параметрическое исследование этого лазера, работающего на колебательно-вращательных переходах основной полосы ($V \rightarrow V-1$) молекулы СО. Определены оптимальные условия его работы (состав и давление газовой смеси, параметры ВЧ накачки) в режиме свободной многочастотной генерации. Максимальная полученная в экспериментах средняя мощность лазера составила ~ 12 Вт, а его КПД достигал $\sim 14\%$. Впервые реализован частотно-селективный режим работы криогенного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением. Одночастотная генерация была получена на ~ 100 лазерных линиях в спектральном диапазоне $4.9\text{--}6.5\text{ мкм}$ со средней выходной мощностью от нескольких единиц до нескольких десятков милливатт. Также впервые была осуществлена работа щелевого ВЧ СО лазера на колебательно-вращательных переходах обертоновой полосы ($V \rightarrow V-2$) молекулы СО в спектральном диапазоне $2.5\text{--}3.1\text{ мкм}$ со средней выходной мощностью до 0.3 Вт. Все результаты были получены без принудительной замены газовой смеси в разрядной камере. При фиксированных экспериментальных условиях стабильная генерация (с флуктуациями выходных характеристик не более $\pm 10\%$) была реализована на временном промежутке более одного часа, что позволяет говорить о том, что впервые реально осуществлен отпаянный режим работы криогенного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

1. ВВЕДЕНИЕ

СО лазер, работающий на колебательно-вращательных переходах основной полосы ($V \rightarrow V-1$) молекулы СО ($\lambda \sim 4.9-7.5$ мкм), является источником лазерного излучения в среднем ИК диапазоне [1], удобным для решения различных фундаментальных и прикладных задач. При создании специальных условий такой лазер может работать также и на обертоновых переходах ($V \rightarrow V-2$) молекулы СО ($\lambda \sim 2.5-4.2$ мкм). Выходной спектр СО лазера (суммарно на основных и обертоновых переходах) может состоять из более чем 1000 спектральных линий [2, 3]. 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 т.д.) (Рис.1), но и сильных загрязнителей, токсинов, взрывчатых и наркотических веществ, надежное детектирование которых представляет сегодня весьма актуальную проблему.

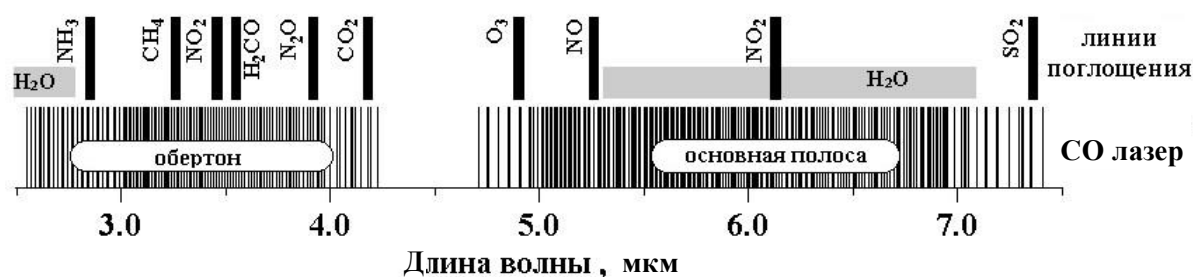


Рис.1. Положение спектральных линий СО лазера и линий поглощения различных веществ.

Оценки [4] 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 (в том числе проточных и отпаянных CO_2 и

СО) лазеров с диффузионным охлаждением, возбуждаемых емкостным поперечным высокочастотным (ВЧ) разрядом (см., например [5-14]). 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 уменьшение напряжения источников питания, повышение энергетической эффективности, простота модуляции и управления выходной мощностью лазеров. Кроме того, ВЧ разряд позволяет возбуждать достаточно большие объемы активной среды (для планарной геометрии) при давлениях в несколько десятков Тор без использования источников внешней ионизации. По сравнению с РПТ, ВЧ разряд оказывается более устойчивым.

Известно, что СО лазер демонстрирует наилучшие выходные характеристики при криогенных температурах активной газовой смеси. Это особенно актуально для оберточного СО лазера. До настоящего времени СО лазеры с ВЧ накачкой исследовались по большей части при комнатной или немного пониженной (до $\sim(-20 \div -30)^{\circ}\text{C}$) температуре [5, 6, 7, 9, 15] активной среды. Исключение составляют лишь несколько работ (см., например, [11, 16, 17]). Информация о реализации оберточной генерации в диффузионно охлаждаемых щелевых СО лазерах с ВЧ накачкой в литературе отсутствует.

Поэтому практически важной задачей является создание компактного отпаянного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением с охлаждением его активной среды до низких температур. Такой лазер, сочетающий в себе относительную простоту и компактность, присущие щелевым ВЧ конструкциям, и 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. Целью настоящей работы было создание отпаянного щелевого криогенного СО лазера с ВЧ возбуждением и исследование его генерационных характеристик. В работе также сообщается о первых экспериментах по реализации частотно-селективного режима генерации СО лазера с ВЧ возбуждением и о получении лазерной генерации на колебательно-вращательных переходах оберточной полосы ($V \rightarrow V-2$) молекулы СО.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.

Эксперименты по исследованию характеристик криогенного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением проводились на установке, разработанной и изготовленной в лаборатории Газовых лазеров ФИАН. В процессе исследований эта установка подвергалась многочисленным техническим модификациям и в настоящее время состоит из следующих основных частей и систем:

- разрядная камера, внутри которой находятся электродная система и лазерный резонатор;
- ВЧ генератор;
- вспомогательные системы, предназначенные для согласования импеданса нагрузки и выходного сопротивления ВЧ генератора, для вакуумной откачки и напуска газов, для подачи жидкого азота к электродной системе, для измерения энергетических, временных и спектральных характеристик лазерного излучения (Рис.2).

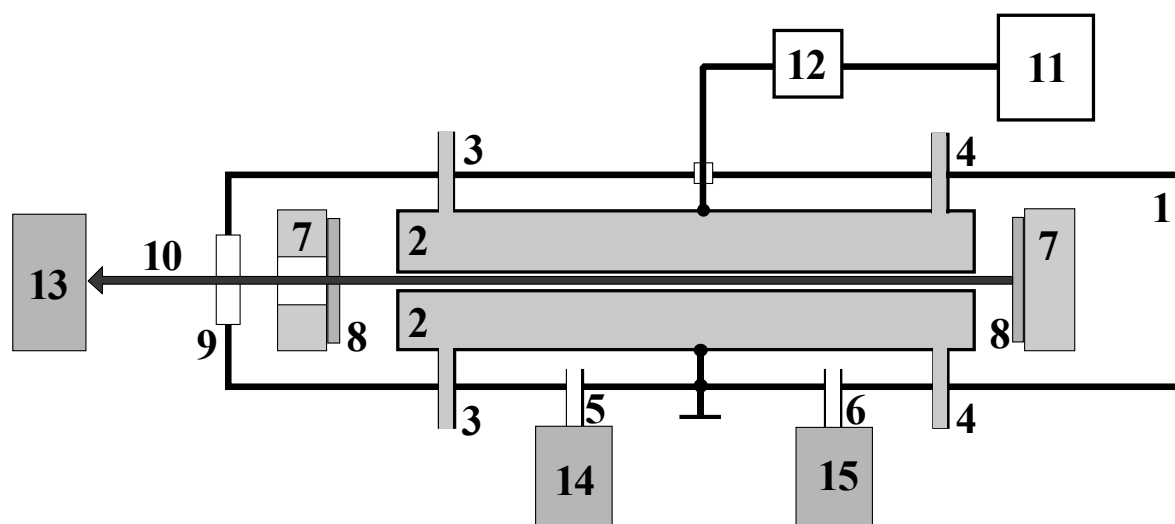


Рис.2. Схема щелевой СО лазерной установки с ВЧ возбуждением. 1 - разрядная камера; 2 - электроды; 3,4 - вход/выход жидкого азота; 5 - напуск газов; 6 - вакуумная откачка; 7 - крепеж резонаторной оптики; 8 - зеркала резонатора; 9 - выходное окно; 10 - лазерное излучение; 11 - ВЧ генератор; 12 - система согласования ВЧ нагрузки; 13 - система измерения лазерных параметров; 14 - система приготовления газовой смеси; 15 - система вакуумной откачки.

2.1. Разрядная камера

Разрядная камера (Рис.3), изготовленная из нержавеющей стали, имеет внутренний объем ~ 8 л и может быть вакуумирована до остаточного давления $\sim 10^{-2}$ Тор.

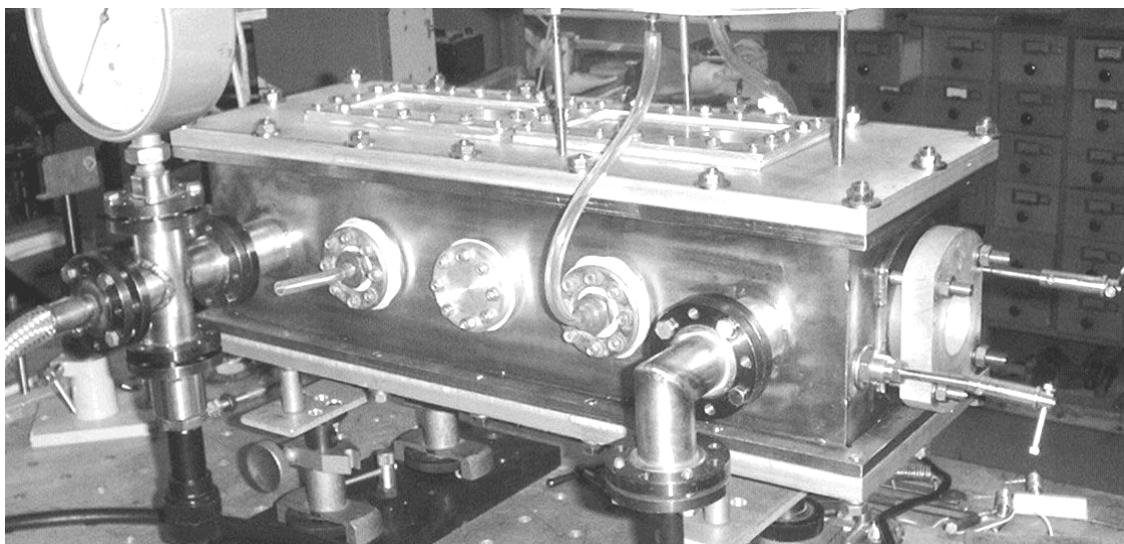


Рис.3. Разрядная камера криогенного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

На боковых стенках разрядной камеры имеются отверстия с фланцами для подсоединения системы вакуумной откачки, системы напуска компонентов газовой смеси, патрубков подачи и дренажа жидкого азота к электродной системе (отдельно для каждого из двух электродов), токовводов для подачи ВЧ напряжения на электроды. На торцевых стенках камеры расположены оптические окна для вывода лазерного излучения и юстировочные устройства, обеспечивающие настройку зеркал резонатора, расположенного внутри камеры. На верхней крышке камеры предусмотрено два иллюминатора для визуального наблюдения за ВЧ разрядом.

2.2. Электродная система

Электродная система установки состоит из двух пустотелых латунных электродов, к каждому из которых подводятся две сильфонные трубки (для ввода и дренажа хладагента), через которые непрерывно прокачивается жидкий азот. Благодаря этому электроды могут быть охлаждены до температуры ~ 120 К. В экспериментах использовались две электродные системы различной конструкции (Рис.4, 5).

ВЧ разрядный зазор был образован электродами, фиксированными на массивном металлическом основании при помощи диэлектрических держателей с регулировочными винтами. Длина электродов обеих систем вдоль оси лазерного резонатора составляла 250 мм. Высота разрядного промежутка составляла 16 мм для системы А и 30 мм для системы Б. Рабочие поверхности

электродов были отполированы до зеркального блеска. Расстояние между электродами можно было варьировать для изменения вкладываемой ВЧ мощности на единицу объема активной среды.

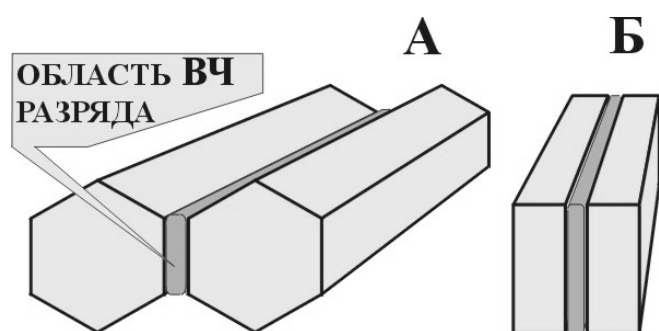


Рис.4. Электродные системы различной конфигурации, использованные в экспериментах.



Рис.5. Вид на электродную систему А через выходное окно разрядной камеры (без зеркал резонатора).

Как было отмечено выше, поступательная температура активной газовой смеси сильно влияет на эффективность работы СО лазера (уменьшение температуры приводит к повышению КПД СО лазера). По этой причине были выполнены эксперименты по измерению динамики температуры для одной из электродных систем (А) при ее охлаждении жидким азотом без возбуждения ВЧ разряда и при кратковременном его включении. Одновременно измерялся градиент температуры вдоль ВЧ электродов. Измерения проводились с помощью термопар, помещенных на электроды в двух точках: вблизи входного (Т1) и вблизи дренажного (Т2) патрубков ввода/вывода жидкого азота (см. Рис. 6). Точность измерения температуры составляла примерно $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

В процессе захлаживания электродной системы образовывался градиент температуры вдоль длины электродов. Его максимальное значение составило 60-80К (см. Рис. 6) на полной длине электродов (250 мм) в средней стадии охлаждения ($t=15-25$ мин после начала подачи жидкого азота). Измерения показали, что при постоянной скорости подачи жидкого азота для термализации электродной системы необходимо примерно 30-35 минут. По истечении этого времени температура электродов стабилизируется на уровне $\sim 110\div 120\text{K}$ при разности $T_1-T_2 \sim 10\div 15\text{K}$. Прекращение подачи жидкого азота приводило к симметризации тепловых процессов и, как следствие, к быстрому (3-4 мин) уменьшению температурного градиента T_1-T_2 до величины $\sim 3-5\text{ K}$ (см. период времени $t > 35$ мин на Рис. 6). Примерно такое же уменьшение градиента

температуры наблюдалось и при дальнейшем охлаждении электродной системы на временном интервале $t \sim 45-50$ мин (Рис.7а).

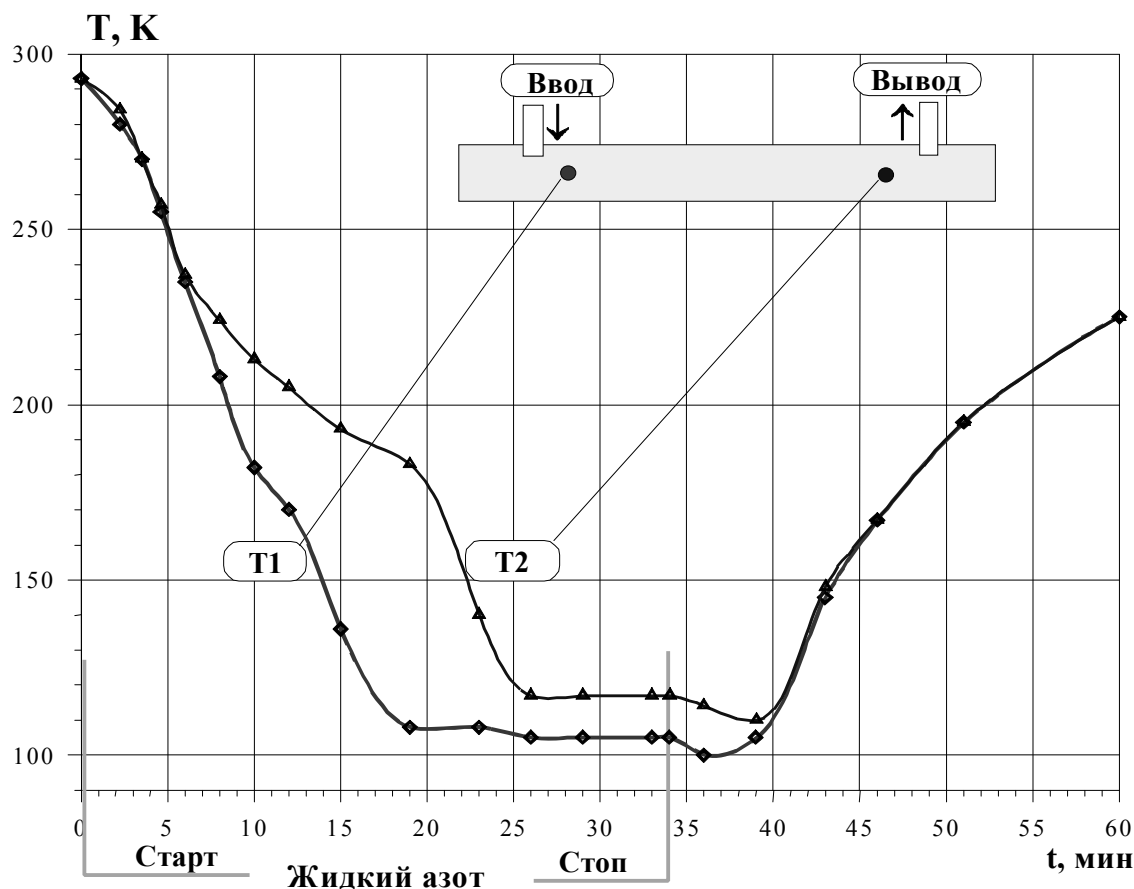


Рис.6. Динамика температуры ВЧ электродов в процессе захлаживания без ВЧ разряда. T1 (T2) – температура вблизи ввода (вывода) жидкого азота. Точка «Старт» ($t=0$) на оси времени соответствует началу подачи жидкого азота; «Стоп» - завершению подачи.

Далее были проведены эксперименты по измерению изменений температуры предварительно охлажденных электродов после включения между ними ВЧ разряда фиксированной мощности на заданное время (Рис.7б-г). После предварительного охлаждения электродной системы в течение ~ 45 мин ($T_1, T_2 \sim 105$ К), в разрядном промежутке на время $\Delta t = 1$ мин поджигался ВЧ разряд со средней мощностью $\langle P_{ВЧ} \rangle = 100$ Вт ($F = 81.36$ МГц, газ - чистый гелий при давлении 40 Тор, разрядный промежуток ~ 2.8 мм) (Рис.7б). При этом рост температуры электродов (синхронно T1 и T2) составил ~ 4 К. Аналогичные измерения были проведены при $\langle P_{ВЧ} \rangle = 100$ Вт и 200 Вт для временного интервала $\Delta t = 2$ мин. В этих экспериментах рост T1 и T2 составил 5-6 К и 10-12 К, соответственно (Рис.7 в, г). Таким образом, для глубокого криогенного охлаждения (до $T \sim 105-110$ К) электродной системы и для выравнивания

температуры вдоль электродов с точностью лучше $\pm 3-5\text{K}$ необходим относительно длинный период времени, который в наших условиях составил ~ 1 час. Также было показано, что вкладываемая в разряд ВЧ мощность $\sim 200\text{ Вт}$ не приводит к сильному разогреву электродов и, соответственно, газовой смеси в разрядном промежутке.

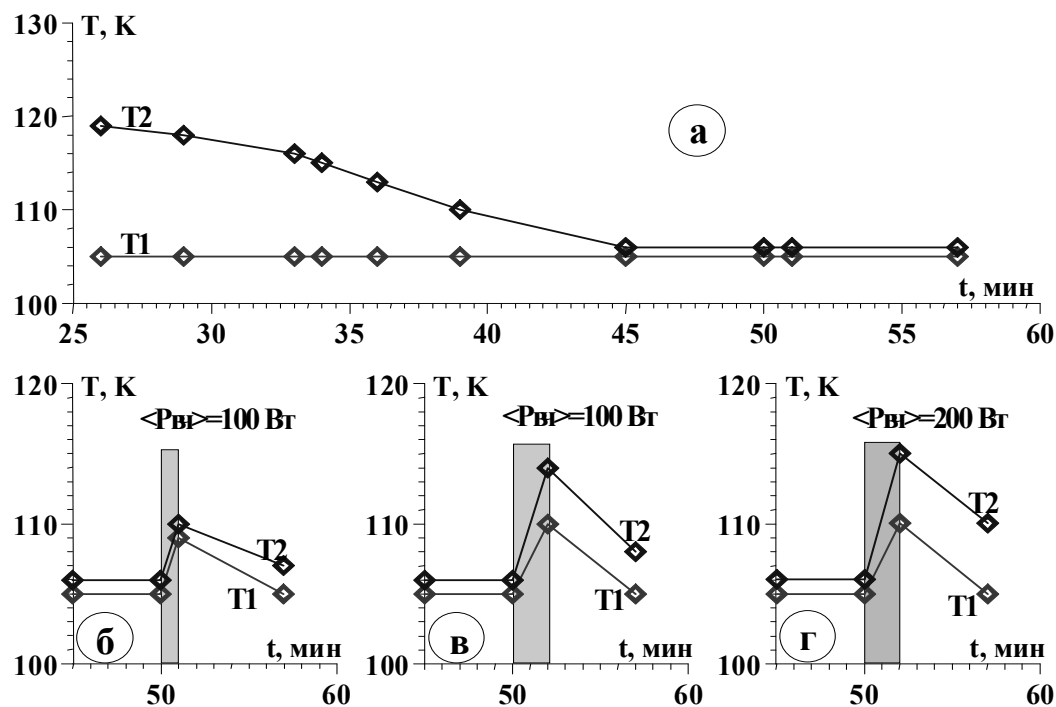


Рис.7. Временная динамика температуры электродов (обозначения T1 и T2 - как на Рис.6) без ВЧ разряда (а) и с ВЧ разрядом в гелии, включенном на фиксированный промежуток времени Δt (б-г). $\langle P_{\text{ВЧ}} \rangle = 100\text{ Вт}$ (б,в) и 200 Вт (г); $\Delta t = 1\text{ мин}$ (б) и 2 мин (в,г);

Электродная система **Б** была конструктивно выполнена более легкой, а подающие и дренажные трубки системы подачи жидкого азота для нее – увеличенного диаметра. Эти факторы способствовали более быстрой динамике установления равновесной температуры электродов при их захлаживании (типичное время готовности лазера к работе составило для электродной системы **Б** не более 15 минут).

Следует также отметить, что работа электроразрядных СО лазеров при криогенных температурах кислородосодержащей плазмы активной среды (кислород обычно добавляется в активную газовую смесь для компенсации диссоциации 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 и иногда приводит к разрушению

экспериментальных криогенных электроразрядных установок, использующих газовые смеси, содержащие окись углерода и/или кислород [18-20]. Для предотвращения таких ситуаций, вырабатываемый жидкий озон необходимо непрерывно удалять из электроразрядной камеры. По этой причине криогенные СО лазеры, как правило, должны работать в режиме прокачки газа, который необходимо поддерживать длительное время даже после выключения разряда. Описанная в настоящей работе конструкция компактного криогенного отпаянного щелевого СО лазера с ВЧ накачкой позволяет реализовать удаление жидкого озона из области ВЧ разряда под действием силы тяжести и обеспечить его нагрев и газификацию на стенках разрядной камеры, имеющих комнатную температуру.

2.3. Лазерный резонатор.

В различных экспериментальных сериях по исследованию генерационных лазерных характеристик использовались резонаторы различной конфигурации, общим параметром которых была длина, составлявшая 270 мм. Данные зеркал и оптические схемы будут приведены ниже в соответствующих разделах.

Юстировка зеркал резонатора производилась двухкоординатными регулировочными устройствами, обеспечивавшими механическую развязку оптических элементов от остальных узлов разрядной камеры с помощью карданных передач вращательных усилий. Для обеспечения точной настройки зеркал в каждом регулировочном узле была использована замедляющая шестеренчатая пара. Термическая стабилизация резонаторного модуля (Рис.8) осуществлялась четырьмя инваровыми стержнями, соединяющими оправы крепления зеркал.

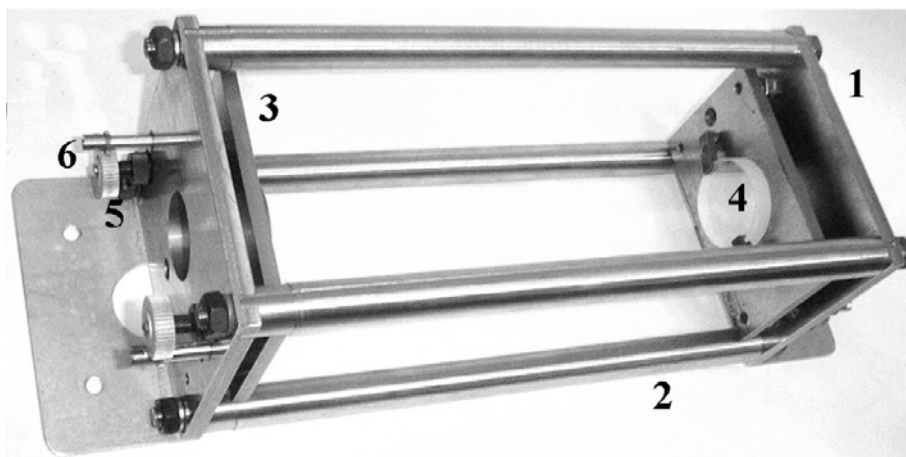


Рис.8. Резонаторный модуль. 1 - неподвижная пластина, 2 - инваровый стержень, 3 - подвижная пластина, 4 - зеркало резонатора, 5 - юстировочный винт, 6 - шестеренчатая пара.

2.4. ВЧ генератор

Для возбуждения разряда использовался высокочастотный генератор типа RFPS-500AM с максимальной выходной мощностью в непрерывном режиме $P_{\max}=500$ Вт. Рабочая частота ВЧ генератора составляла $F=81.36$ МГц. Генератор мог также работать в импульсно-периодическом режиме с низкочастотной амплитудной модуляцией выходной ВЧ мощности ($F_{\text{мод}}=0.1\text{-}25$ кГц). Структура импульса, подаваемого генератором на электроды лазера такова, что сначала следует предимпульс, который облегчает поджиг разряда в рабочей смеси, а за ним основной импульс накачки (Рис.9).

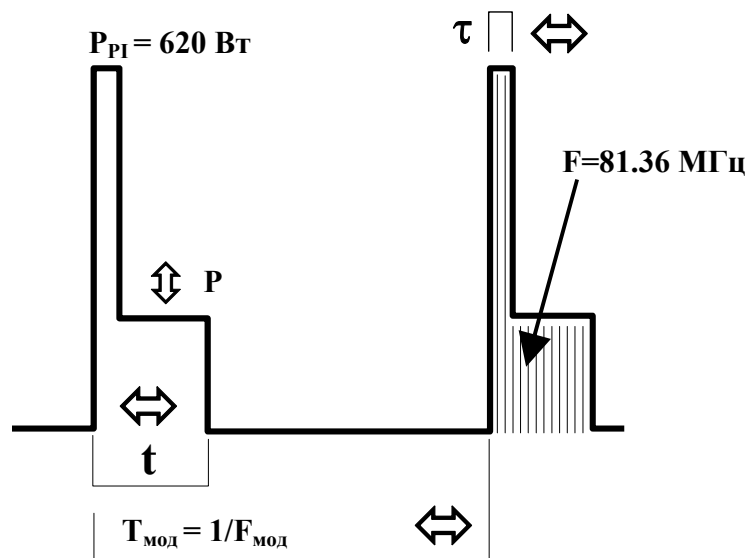


Рис.9. Структура импульса ВЧ мощности возбуждения. $T_{\text{мод}}$ - период модуляции; τ - длительность предимпульса; t - длительность основного импульса (включая τ); P - пиковая мощность основного импульса.

При этом средняя ВЧ мощность $\langle P_{\text{ВЧ}} \rangle$, подводимая к разрядному промежутку, могла варьироваться при накачке основными импульсами как их скважностью $t/T_{\text{мод}}=0.1\div 1.0$, так и мгновенной амплитудой ВЧ мощности $P=(0.25\div 1.0)P_{\max}$ в каждом импульсе ($T_{\text{мод}}=1/F_{\text{мод}}$ - период модуляции, t - длительность модулирующего импульса). Также накачка могла осуществляться только предимпульсами. При этом амплитуда ВЧ мощности была фиксирована и равна $P_{PI}=620$ Вт, а длительность предимпульсов τ могла изменяться в диапазоне $(0.01\div 0.1)T_{\text{мод}}$ (Рис.9). Информация о параметрах накачки и о том,

каким из указанных способов они изменялись, будет приведена ниже для каждой экспериментальной серии.

2.5. Система ВЧ согласования

Для эффективной работы установки важно было контролировать величину ВЧ мощности, отраженной от разрядной камеры обратно в ВЧ генератор из-за рассогласования выходного импеданса генератора (50 Ом) и динамической нагрузки, каковой являлась плазма разряда, формируемая в электродной системе. Эта проблема решалась посредством регулируемой Т-образной LC-системы согласования (Рис.10), через которую ВЧ мощность подводилась к разрядному промежутку.

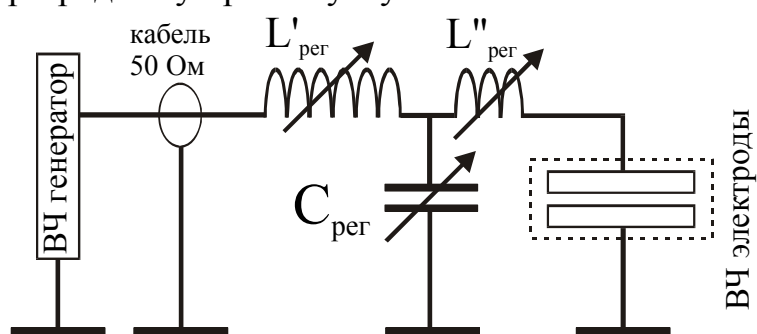


Рис.10. Электрическая схема и внешний вид цепи согласования выходного сопротивления ВЧ генератора с динамической нагрузкой.

Схема состоит из двух катушек индуктивности $L'_{\text{пер}}$, $L''_{\text{пер}}$ и переменной емкости $C_{\text{пер}}$. Эти элементы были размещены на кварцевой пластине для минимизации электрических потерь, связанных с токами смещения в материале.

2.6. Дополнительные системы обеспечения .

Система криогенного охлаждения состоит из теплоизолированного резервуара с двумя симметричными выходами жидкого азота в нижней его части. Эти выходы соединены гибкими полиэтиленовыми трубками с вводами жидкого азота на стенке разрядной камеры. Испаренный внутри электродов азот удаляется через дренажные выводы азота на боковой стенке разрядной камеры. Резервуар снабжен герметичной крышкой для принудительной (под давлением) подачи жидкого азота через систему охлаждения.

Система приготовления газовой смеси позволяет работать одновременно с пятью газовыми компонентами при полном давлении в лазерной камере до 200 Тор.

Для измерения средней мощности лазерного излучения использовался автоматический термопарный калориметрический датчик фирмы OPHIR с обнаружительной способностью ~ 1 мВт и максимальной измеряемой мощностью ~ 10 Вт. Погрешность измерений составляла $\sim 3-5\%$ в зависимости от используемого предела измерений.

Временные параметры лазерного излучения фиксировались с помощью скоростного ИК датчика PEM-L-3 (временное разрешение $\sim 10^{-8}$ с) или чувствительного криогенного Ge:Аu датчика (временное разрешение $\sim 10^{-6}$ с), подключенных к цифровому осциллографу Tektroniks TDS-1012 с полосой пропускания ~ 100 МГц.

Спектральные измерения проводились с помощью ИК спектрографа “CO Spectrum Analyzer”, Model 16-C со спектральным разрешением ~ 0.5 см $^{-1}$. Также в различных сериях экспериментов использовался зеркальный дифракционный монохроматор.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Щелевой СО лазер с ВЧ накачкой на переходах основной полосы ($V \rightarrow V-1$) молекулы СО: свободная генерация.

Энергетические характеристики

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 которых изменялись условия накачки (мощность и режим накачки, частота модуляции) или свойства активной среды лазера (состав смеси, ее давление). Большая часть экспериментов проводилась на электродной системе А с высотой разрядной щели 16 мм и межэлектродным зазором 3 мм. В тех случаях, когда использовалась электродная система Б или другой межэлектродный зазор – этот факт будет помечен на графиках и в комментариях к ним. Лазерный резонатор во всех экспериментах состоял из «глухого» (кварц с напылением из Al) сферического ($R_{\text{крив}}=1500$ мм) зеркала и плоского выходного зеркала (пластина из CaF_2 с диэлектрическим покрытием) с коэффициентом отражения $(85 \pm 5)\%$ в диапазоне длин волн 4.9-7.1 мкм (Рис.11).

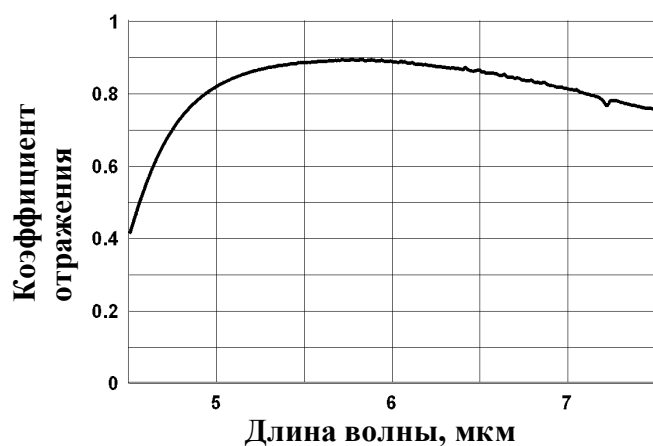


Рис.11. Спектральная характеристика выходного зеркала резонатора щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением, работающего на переходах основной полосы молекулы СО.

Влияние состава и давления активной среды

Известно, что выходные лазерные характеристики зависят от состава активной газовой смеси и ее давления. В лазерных смесях обычно присутствуют азот и кислород в различных пропорциях. В наших экспериментах в качестве добавок к активной смеси СО:Не был использован воздух (соотношение концентраций азота к кислороду в нем принималось 4:1). В отпаянных СО лазерах, работающих при комнатной [15] или слегка пониженной [6, 7] температурах, а также в СО лазерах с быстрым протоком газа при криогенных

температурах [5], обычно используются газовые смеси с небольшим содержанием кислорода $\text{CO}:\text{O}_2:\text{Y}=1:(0.03\div 0.05):\text{Y}$ (Y - суммарное содержание остальных компонент). Однако применение таких смесей в наших экспериментах приводило к интенсивному образованию углеродной пленки на рабочих поверхностях охлаждаемых электродов, что существенно меняло структуру ВЧ разряда, а также сильно ухудшало оптические отражательные свойства рабочих поверхностей электродов. Эти факторы существенно (в 4-5 раз) уменьшали выходные характеристики щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением. 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.

На Рис.12 представлены результаты оптимизации лазерных характеристик по содержанию гелия в трехкомпонентной газовой смеси $\text{CO}:\text{Воздух}:\text{He}=1:1:\text{X}$. Как и для СО лазеров других типов, в щелевом СО лазере существует оптимальная концентрация гелия в активной газовой смеси. Эта концентрация определяется следующими факторами: при малых концентрациях He теплопроводность активной среды недостаточна для эффективного отвода тепла из зоны разряда и выходные характеристики лазера оказываются невысокими; увеличение концентрации He ведет к повышению выходной лазерной мощности и КПД благодаря увеличению удельной мощности накачки в пересчете на одну молекулу СО и улучшению условий теплопроводности; при очень больших концентрациях He происходит снижение выходных характеристик лазера из-за уменьшения полного количества активных молекул СО.

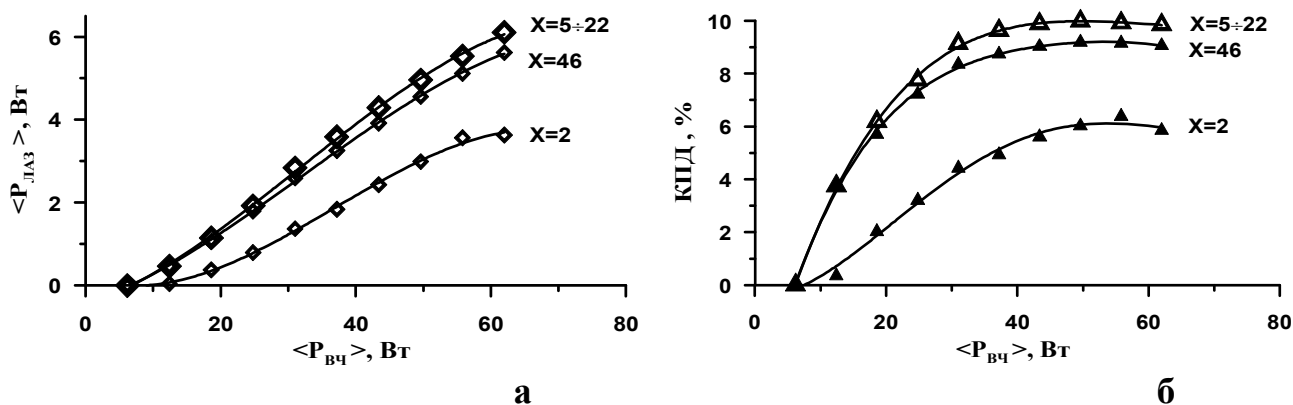


Рис.12. Выходные характеристики щелевого СО лазера с ВЧ накачкой (а – средняя выходная мощность, б – эффективность) для газовых смесей с различным содержанием гелия. Газовая смесь $\text{CO}:\text{Воздух}:\text{He}=1:1:\text{X}$, давление 26 Тор, $F_{\text{мод}}=500$ Гц, режим модуляции - только предимпульсы, τ - изменяемый параметр. Электродная система А.

Эксперименты показали (Рис.12), что в щелевом СО лазере с ВЧ возбуждением предпочтительно использовать активные газовые смеси с относительно высоким ($\sim 70\div 90\%$) содержанием He.

Экспериментально было найдено также оптимальное давление активной газовой смеси (Рис.13), определяемое балансом между теплопроводностью смеси, числом активных лазерных молекул и удельной мощностью накачки в пересчете на молекулу СО.

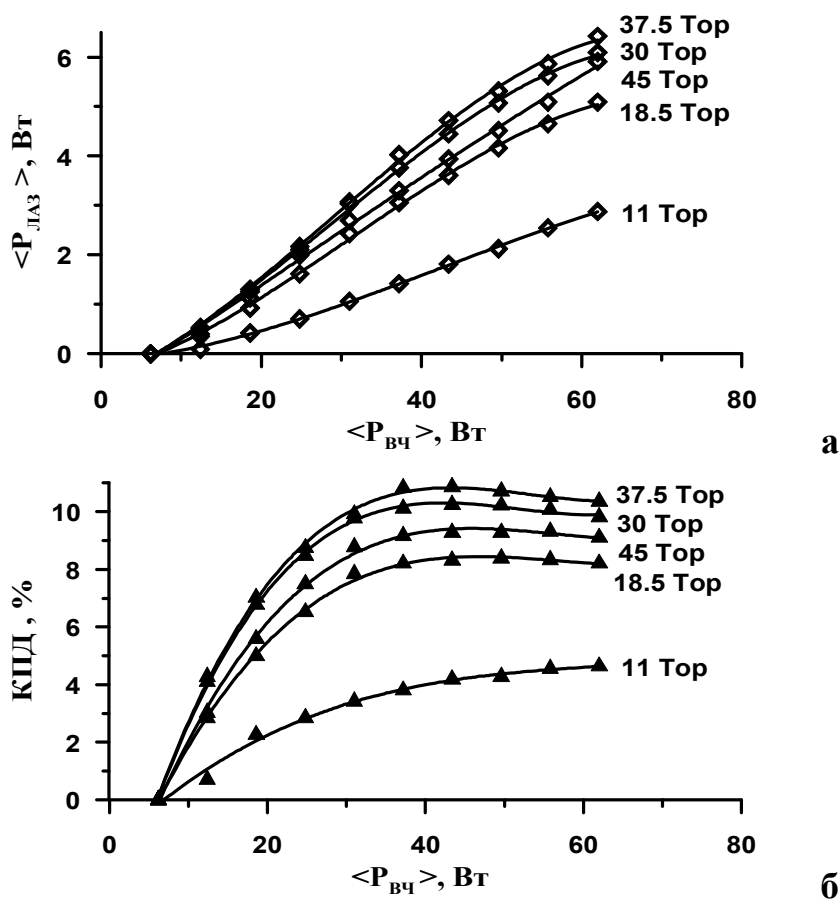


Рис.13. Выходные характеристики щелевого СО лазера с ВЧ накачкой (а – средняя выходная мощность, б – эффективность) для различных давлений активной среды. Смесь СО:Воздух:He=1:1:10, $F_{\text{мод}}=500$ Гц. Режим модуляции - только предимпульсы, τ - изменяемый параметр. Электродная система А.

Максимальный достигнутый в экспериментах с электродной системой А КПД щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением был получен при давлении этой смеси 37.5 Тор, и его величина составила $\sim 11\%$. В данных экспериментах импульсное значение вкладываемой ВЧ мощности, и соответственно, среднеквадратичное значение напряжения на электродах, были постоянны, а средняя вкладываемая мощность варьировалась длительностью импульсов модуляции. Поэтому эффективность возбуждения колебательных степеней

свободы молекул СО, которая определяется значением параметра E/P , имела максимум при давлении ~ 35 -40 тор (смесь СО:Воздух:Не=1:1:10).

Выбор частоты модуляции ВЧ мощности накачки.

Для дальнейшего параметрического исследования СО лазера с ВЧ возбуждением необходимо было определить оптимальную частоту модуляции ВЧ мощности накачки. В этой серии экспериментов (Рис.14) состав газовой смеси и ее давление были фиксированы и составляли СО:Воздух:Не=1:1:10 и 37 Тор, соответственно.

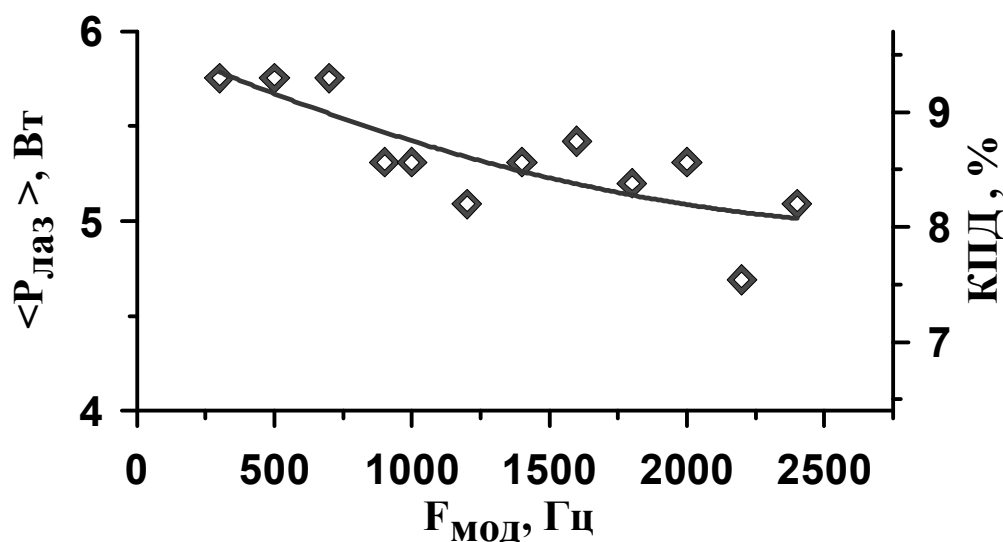


Рис.14. Средняя выходная мощность ($\langle P_{\text{лаз}} \rangle$) и эффективность (КПД) щелевого СО лазера в зависимости от частоты модуляции ВЧ мощности возбуждения. Газовая смесь - СО:Воздух:Не=1:1:10; давление - 37 Тор; $\langle P_{\text{вч}} \rangle = 62$ Вт. Электродная система А.

При постоянной величине средней мощности ВЧ возбуждения $\langle P_{\text{вч}} \rangle = 62$ Вт, вариации частоты модуляции $F_{\text{мод}}$ (длительность модулирующих импульсов составляла 10% от периода модуляции и изменялась обратно-пропорционально $F_{\text{мод}}$) проявили небольшое уменьшение средней мощности излучения $\langle P_{\text{лаз}} \rangle$ и эффективности СО лазера при увеличении $F_{\text{мод}}$. Для дальнейших экспериментов частота модуляции выбиралась в диапазоне 100-1000 Гц, что соответствует наибольшим значениям мощности излучения и эффективности СО лазера (см. Рис.14).

В режиме накачки рабочей смеси только предимпульсами с фиксированной скважностью (условия Рис.14), при увеличении частоты модуляции одновременно (обратно-пропорционально) уменьшается

длительность импульсов ВЧ накачки (при частоте модуляции $F_{\text{мод}}=2500$ Гц максимальная длительность предимпульсов $\tau_{\text{max}}=(0.1 \cdot T_{\text{мод}})=40$ мкс). В этом случае при фиксированной импульсной и средней мощности, вкладываемой в ВЧ разряд, можно предположить, что оптимальный уровень возбуждения активной среды лазера не достигается в условиях эксперимента при высоких частотах модуляции и энергетические характеристики лазера несколько снижаются при повышении $F_{\text{мод}}$ до величин $\sim 1.5\text{--}2$ кГц и выше.

Влияние мощности ВЧ возбуждения

Мощность ВЧ возбуждения в следующей серии экспериментов изменялась путем увеличения длительности основного импульса ВЧ возбуждения, переходя в итоге к непрерывному режиму накачки. Был определен верхний предел мощности ВЧ возбуждения, выше которого нагрев активной газовой смеси в разрядной области начинает существенно уменьшать выходную мощность щелевого СО лазера и его КПД (Рис.15). В этих экспериментах режим ВЧ возбуждения был выбран следующим образом: $F_{\text{мод}}=1000$ Гц ($T_{\text{мод}}=1$ мс), $\tau=0$ (без предимпульсов), пиковая мощность основного импульса ВЧ мощности $P=400$ Вт. Средняя мощность ВЧ возбуждения $\langle P_{\text{ВЧ}} \rangle$ изменялась от 40 Вт до 280 Вт путем вариации длительности импульса модуляции t в диапазоне $t=(0.1\text{--}0.7) \cdot T_{\text{мод}}$. Крайние правые точки на Рис.15 а,б соответствуют непрерывному режиму работы ВЧ генератора при $P=400$ Вт. ($t=T_{\text{мод}}$).

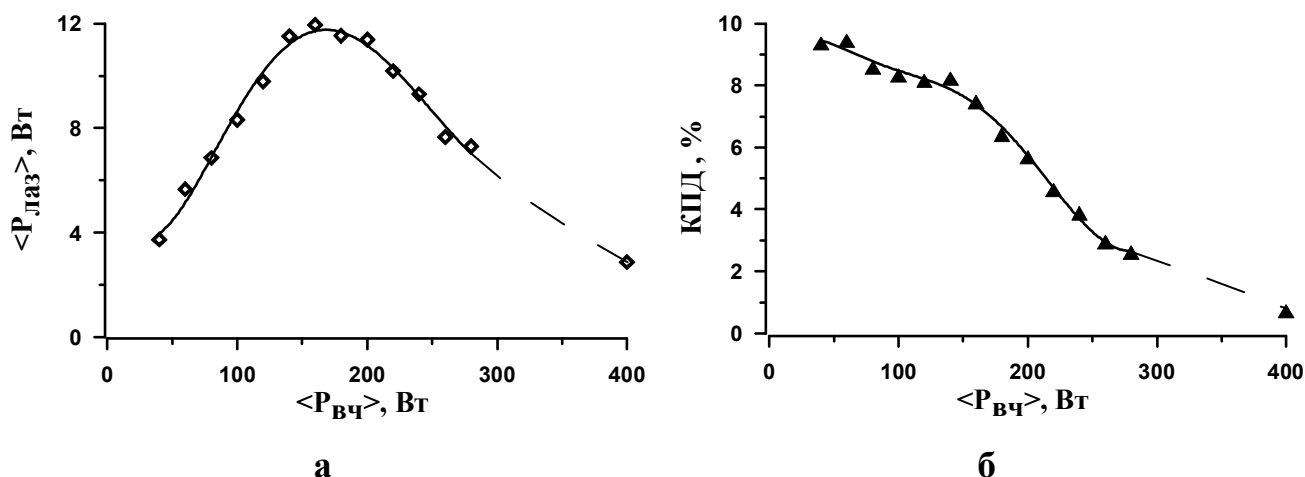


Рис.15. Зависимости средней выходной мощности (а) и КПД (б) щелевого СО лазера от средней мощности ВЧ возбуждения. Газовая смесь - СО:Воздух:Не=1:1:5; давление - 26 Тор; $F_{\text{мод}}=1000$ Гц, $\tau=0$, $P=400$ Вт, t - изменяемый параметр. Электродная система А.

При увеличении средней мощности ВЧ возбуждения от ~40 Вт до ~150 Вт средняя выходная мощность СО лазера возрастала и достигала своего максимального значения ~12 Вт (см. Рис.15а). В этом диапазоне $\langle P_{ВЧ} \rangle$ эффективность щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением оставалась примерно на одном уровне и составляла ~8÷9% (Рис.15б). Дальнейшее увеличение $\langle P_{ВЧ} \rangle$ (~150-200 Вт и выше) приводило к резкому падению и выходной мощности СО лазера и его КПД. Видимо, в данных условиях жидкий азот активно вскипает внутри электродов, между поверхностью электрода и жидким азотом появляется слой пара с низкой теплопроводностью, который препятствует отводу тепла из ВЧ разряда. Обеспечить более эффективный отвод тепла можно увеличением скорости прокачки через электроды жидкого азота, что было учтено при конструировании электродной системы Б.

Геометрия электродной системы.

Аналогичные описанным выше серии экспериментов были проведены с электродной системой Б с увеличенной до 30 мм высотой разрядной щели. Такие изменения рабочего объема лазера примерно вдвое уменьшили среднюю плотность вкладываемой в активную среду ВЧ мощности, изменили условия охлаждения и конвекции газа. На Рис.16 представлены энергетические характеристики щелевого СО лазера, оснащенного различными электродными системами, в оптимальных для каждой системы условиях накачки.

Максимальная эффективность была получена для электродной системы Б и достигала 14%. По этой причине все дальнейшие эксперименты были выполнены с этой электродной системой.

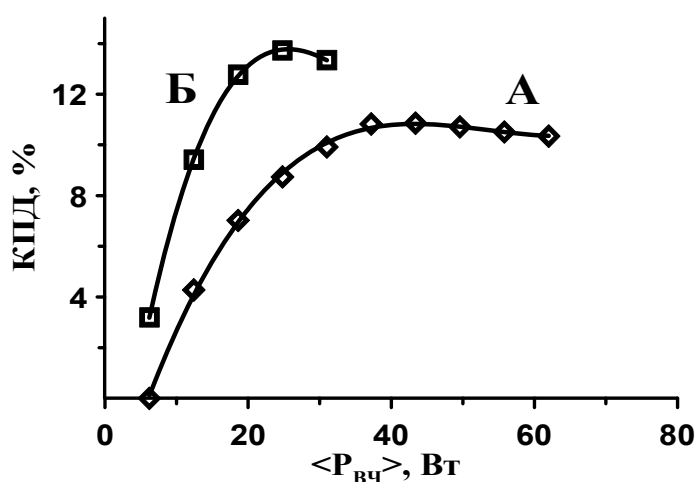


Рис.16. Зависимость КПД щелевого СО лазера от средней мощности ВЧ возбуждения для различных электродных систем. Высота электродов 16 мм (А) и 30 мм (Б). Газовая смесь СО:Воздух:Не=1:1:10.

Спектрально-временные характеристики

Выходной спектр излучения щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением зависел от условий экспериментов. Спектральные характеристики лазера в деталях не исследовались. Для примера на Рис.17 приведен один из полученных спектров излучения СО лазера. Следует заметить, что процедура регистрации спектра в этих экспериментах была оценочная и имела относительно высокий порог чувствительности. По этой причине, количество лазерных линий, на которых происходила генерация излучения, могло быть гораздо больше, чем представлено на Рис.17.

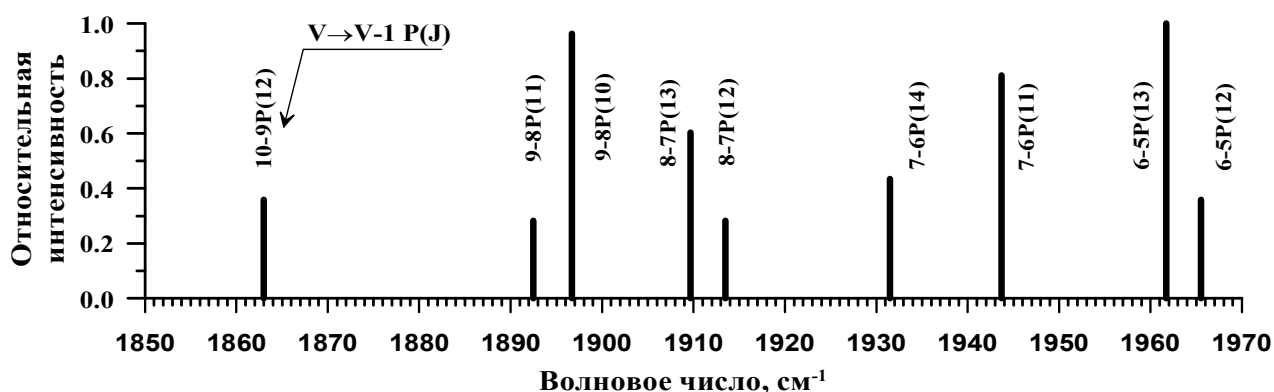


Рис.17. Типичный выходной спектр излучения щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением. Газовая смесь СО:Воздух:Не=1:1:10, давление 30 Тор, $F_{\text{мод}}=500$ Гц.

Типичные осциллограммы интенсивности выходного излучения щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением в режиме низкочастотной модуляции мощности ВЧ накачки представлены на Рис.18. Возбуждение активной среды проводилось импульсами, следующими с частотой модуляции $F_{\text{мод}} = 100$ Гц и имеющими разную длительность.

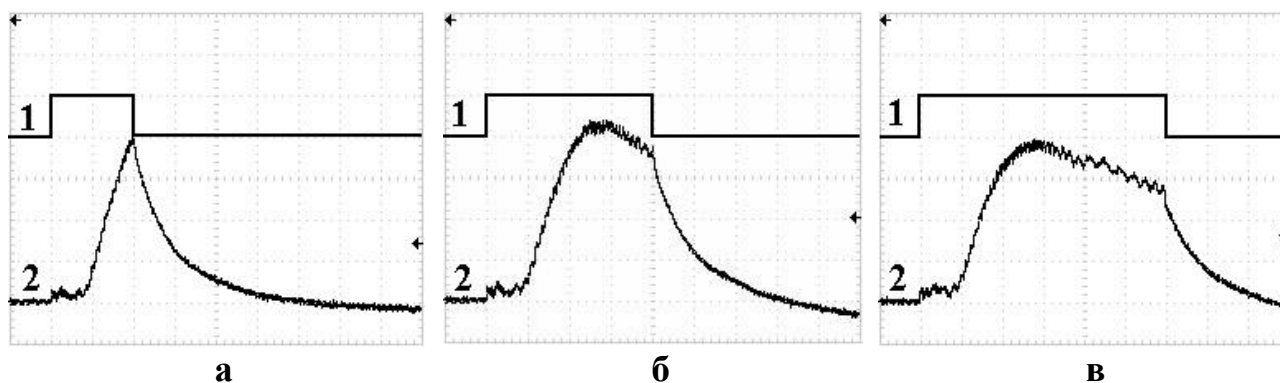


Рис.18. Осциллограммы огибающей импульса ВЧ накачки (1) и интенсивности импульсов лазерного излучения (2) для различных длительностей импульсов ВЧ накачки при фиксированной частоте модуляции ($F_{\text{мод}} = 100$ Гц). СО:Воздух:Не = 1:1:10, давление 26 тор, развертка 100 мкс/дел.

Эксперименты показали, что в наших условиях уже при длительности импульса накачки ~ 400 мкс (Рис.18 б) интенсивность генерация начинает спадать еще до окончания импульса накачки вследствие перегрева смеси. При длительности импульса возбуждения ~ 600 мкс это видно еще более явно (Рис.18 в).

В целом, необходимо отметить, что в зависимости от режима ВЧ возбуждения (частота модуляции, скважность и абсолютная длительность импульсов) ВЧ СО лазер может работать как в импульсно-периодическом (короткие импульсы с большой скважностью), так и в квази-непрерывном режимах (Рис.19).

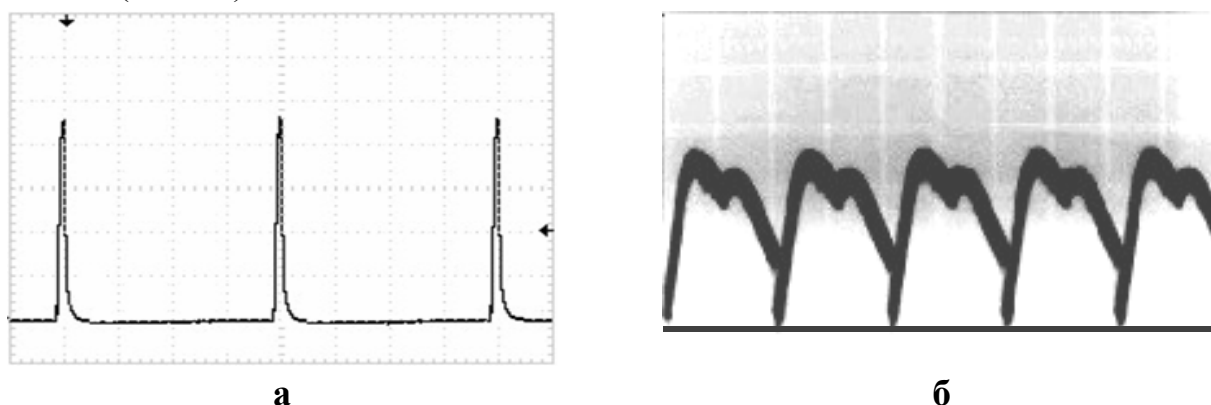


Рис.19. Импульсно-периодический (а) и квазинепрерывный (б) режимы генерации щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением. Газовая смесь СО:Воздух:Не = 1:1:5, давление 26 Тор, $F_{\text{мод}}=100$ Гц, $t=0.1 T_{\text{мод}}$ (а) и $F_{\text{мод}}=1000$ Гц, $t=0.4 T_{\text{мод}}$ (б). Временная развертка 2.5 мс / дел. и 0.5 мс / дел.

Долговременная стабильность.

В экспериментах была проведена контрольная серия измерений средней выходной мощности щелевого СО лазера на большом временном промежутке при неизменных условиях накачки (Рис.20).

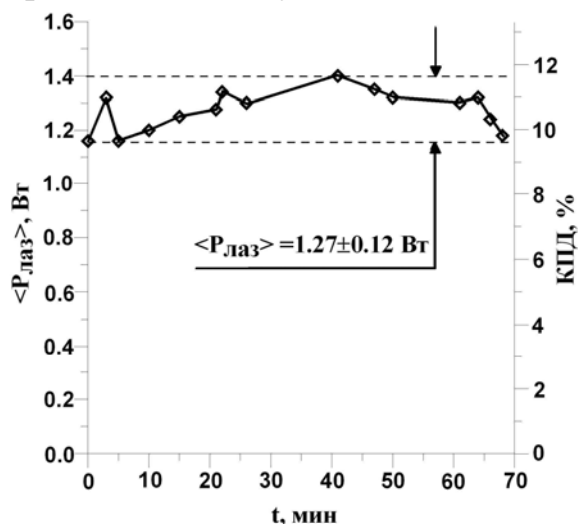


Рис.20. Зависимость средней выходной мощности щелевого СО лазера от времени при неизменных условиях накачки ($\langle P_{\text{вч}} \rangle \sim 12$ Вт).

$F_{\text{мод}}=100$ Гц, $\tau/T_{\text{мод}}=0.02$,
СО:Воздух:Не=1:1:10, давление 22 Тор.

В течение более, чем одного часа флуктуации средней выходной мощности лазера не превышали $\sim 10\%$ (без обновления состава смеси), что позволяет говорить о том, что впервые осуществлен отпаянный режим работы криогенного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

3.2. Щелевой СО лазер с ВЧ накачкой на переходах основной полосы ($V \rightarrow V-1$) молекулы СО: частотно-селективный режим.

Для исследования возможностей применения щелевого СО лазера с ВЧ накачкой в задачах качественного и количественного спектроскопического анализа была проведена серия экспериментов по определению характеристик такого лазера, работающего в частотно селективном режиме. В этих экспериментах использовалась электродная система Б и лазерный резонатор, схема которого приведена на Рис.21. Активная среда была условно поделена на две равновеликие области - область генерации и область усиления. Область генерации была помещена в лазерный резонатор, состоящий из "глухого" (кварцевая подложка с напылением из Al) вогнутого ($R=1000$ мм) зеркала M1 и дифракционной решетки ДР (210 штр/мм) с выводом излучения в нулевой порядок. Зеркало M2 и ДР были скомпонованы в единый блок (угол между ними равен 90°). При вращении блока ДР+M2 вокруг оси X в процессе частотной перестройки лазерного резонатора, излучение, выведенное в нулевой порядок ДР, проходило по области усиления строго параллельно оси резонатора.

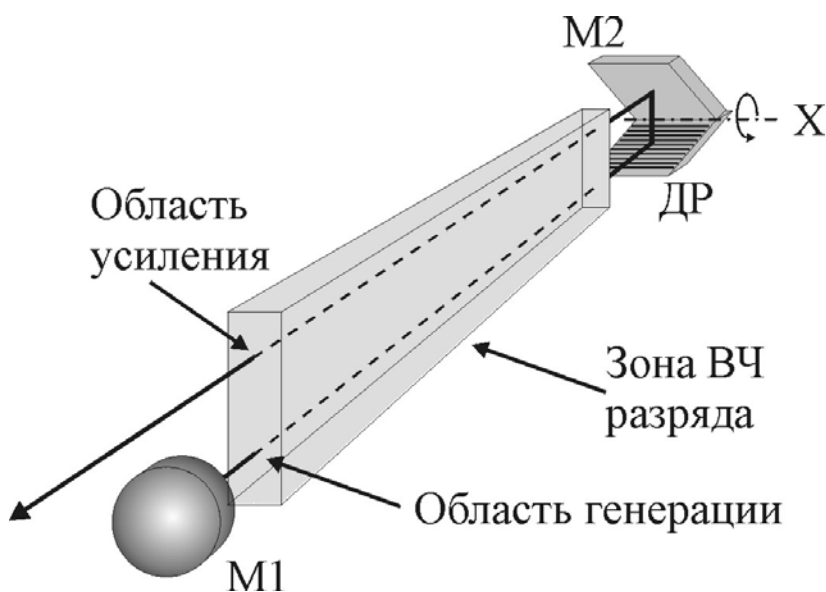


Рис.21. Схема резонатора частотно селективного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

Оптическая схема измерения перестроечных характеристик частотно-селективного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением приведена на Рис.22.

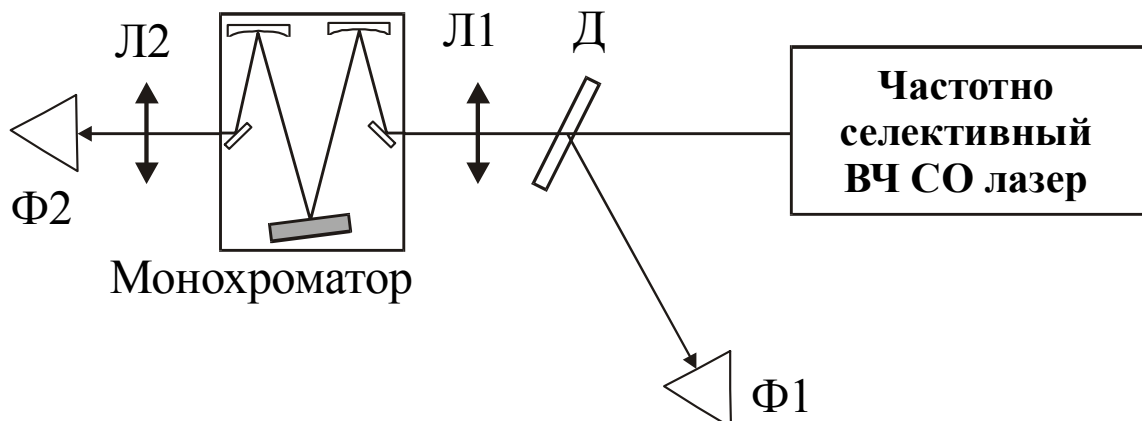


Рис.22. Схема экспериментов по исследованию частотно-селективного режима генерации щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

Часть излучения, вышедшего из частотно-селективного щелевого СО лазера, отраженная от светоделителя Д (плоская пластина из CaF_2), попадала на фотоприемник Ф1. По сигналу с этого приемника настраивался максимум выходной мощности лазера при перестройке резонатора по линиям генерации. Прошедшее через светоделитель излучение фокусировалось короткофокусной линзой Л1 на входную щель монохроматора. Вышедшее из монохроматора излучение с помощью линзы Л2 фокусировалось на приемную площадку фотоприемника Ф2, по максимуму сигнала с которого настраивался монохроматор и определялась длина волны излучения лазера. Калибровка монохроматора осуществлялась по излучению HeNe лазера. Совокупная точность определения длины волны генерации СО лазера с использованием описанной оптической схемы (Рис.22) была не хуже 0.3 см^{-1} . Кроме того, при каждом спектральном измерении между входной щелью монохроматора и линзой Л1 вставлялся измеритель мощности лазерного излучения (на Рис.22 не показан), что позволило измерить спектральное распределение выходной мощности частотно-селективного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

При фиксированных экспериментальных условиях (газовая смесь СО:Воздух:Не=1:1:10, давление 22 Тор, режим накачки - только предимпульсы $\tau=0.05 \cdot T_{\text{мод}}$, $F_{\text{мод}}=500 \text{ Гц}$) была получена перестроечная характеристика, представленная на Рис.23.

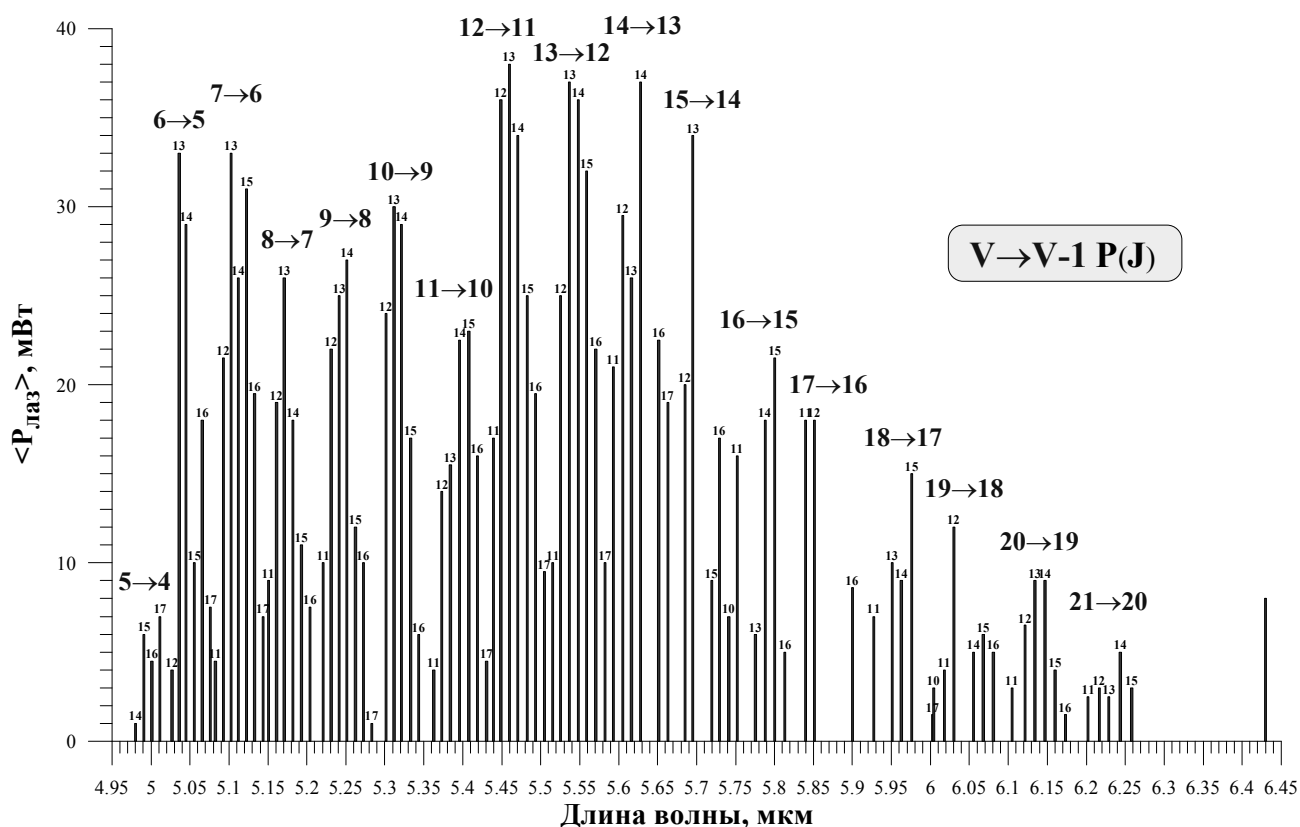


Рис.23. Перестроочная спектрально энергетическая характеристика частотно-селективного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

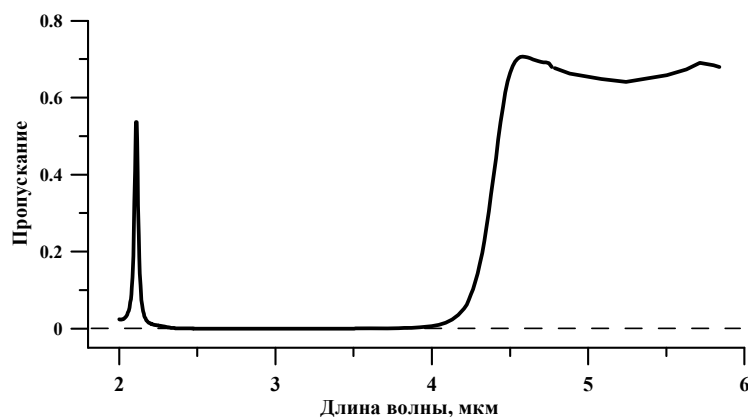
Одночастотный режим генерации лазера в этих условиях был реализован на ~ 100 лазерных линиях в спектральном диапазоне от 4.98 мкм до 6.26 мкм со средней выходной мощностью от нескольких единиц до нескольких десятков милливатт. На рис.23 около каждой линии указан лазерный переход $V \rightarrow V-1 P(J)$. Следует также отметить, что небольшое увеличение средней мощности ВЧ возбуждения путем увеличения длительности импульса накачки (до $\tau = 0.07 \cdot T_{\text{мод}}$) существенно расширяет спектр возможных линий генерации лазера в длинноволновую область (крайняя правая линия на рис.23 в районе 6.43 мкм соответствует границе спектра в этих условиях).

Выяснение всех спектральных возможностей перестраиваемого по частоте щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением требует планомерных параметрических исследований (по составу и давлению активной среды, режимам накачки, параметрам лазерного резонатора и др), которые планируется выполнить в ближайшее время.

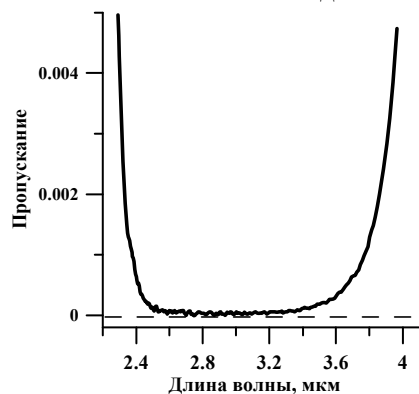
3.3. Щелевой СО лазер с ВЧ накачкой на переходах обертоновой полосы ($V \rightarrow V-2$) молекулы СО.

Основываясь на экспериментальных результатах, полученных при исследовании различных режимов генерации щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением на колебательно-вращательных переходах основной полосы молекулы СО ($V \rightarrow V-1$), описанных выше, и на опыте работы с другими импульсными электроразрядными СО лазерами [1, 2, 10], нами были проведены эксперименты с целью получения генерации излучения в щелевом СО лазере с ВЧ возбуждением на обертоновых ($V \rightarrow V-2$) переходах молекулы СО (спектральный диапазон 2.5-4 мкм).

Учитывая относительно небольшую длину активной среды в щелевом СО лазере (25 см) и существенно более низкий ожидаемый коэффициент усиления на обертоновых переходах по сравнению с переходами на основной полосе [1], в экспериментах использовался устойчивый лазерный резонатор с интерференционными высокоотражающими зеркалами. Спектральные характеристики зеркал лазерного резонатора приведены на Рис.24 и 25. Следует отметить, что эти зеркала имеют очень высокое отражение (более 99%) в области 2.5-3.5 мкм, и малое отражение в спектральной области $\lambda > 5$ мкм, чем обеспечивается подавление генерации на основных переходах, что важно для реализации эффективной обертоновой генерации [1, 2].



а

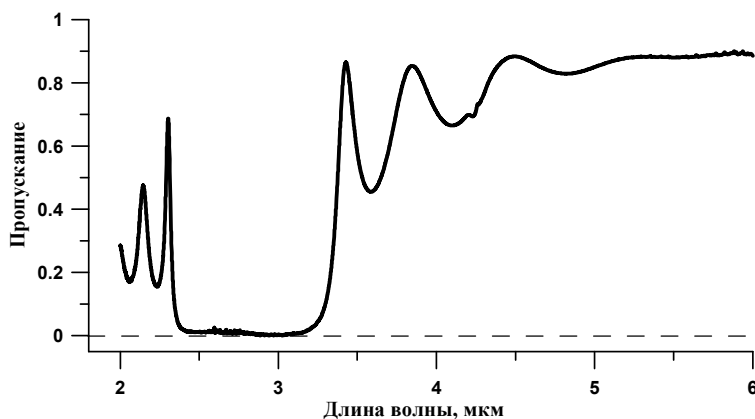


б

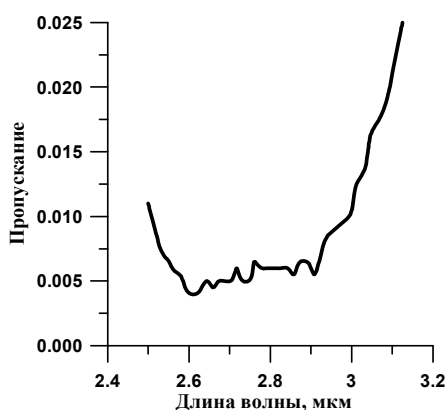
Рис.24. Спектр пропускания заднего «глухого» сферического зеркала. Si подложка с диэлектрическим покрытием, $R_{\text{крив}}=2000$ мм (изготовитель ООО «Электростекло», Россия).

а – полная характеристика,

б – подробная пропись вблизи минимума пропускания



а



б

Рис.25. Спектр пропускания выходного плоского зеркала. Клиновидная подложка из CaF_2 с диэлектрическим покрытием, (изготовитель «Long Star, Ltd» США).
а – полная характеристика,
б – подробная пропись вблизи минимума пропускания

Для регистрации спектрально-энергетических параметров лазера была использована немного модифицированная оптическая схема из предыдущей серии экспериментов (см. Рис.22). Между лазером и светодетелем Д была помещена плоская пластина из ИК кварца толщиной 20 мм, полностью поглощающая излучение с длиной волны более 4 мкм (для отсечения люминесценции и генерации (если таковая возникала) на основных переходах молекулы CO). Для измерения мощности генерации, сосредоточенной в отдельных линиях, после настройки монохроматора и измерения длины волны, между выходной щелью монохроматора и линзой Л2 вставлялся измеритель мощности лазерного излучения. Абсолютная калибровка спектрально-энергетического распределения лазерной мощности проводилась по второму измерителю мощности, который помещался вместо фотодетектора Ф1 (см. Рис.22).

Результаты первых экспериментов по исследованию режима неселективной свободной генерации обертонового щелевого CO лазера с импульсно-периодическим ВЧ возбуждением представлены на Рис.26. В верхней части рисунка показано измеренное распределение мощности генерации

по спектральным линиям. В нижней части рисунка показано расчетное положение обертоновых лазерных линий для колебательных полос $V \rightarrow V-2$ от $7 \rightarrow 5$ до $22 \rightarrow 20$ (в каждой полосе показаны вращательные компоненты $J-1 \rightarrow J$ от $7 \rightarrow 8$ до $14 \rightarrow 15$).

Выходной спектр лазера состоял из ~ 20 линий и охватывал спектральный диапазон от 2.55 до 3.15 мкм. Максимальная мощность в отдельной линии достигала ~ 12 мВт. Суммарно по всем линиям генерации средняя выходная мощность обертонового СО лазера достигала ~ 0.3 Вт при КПД $\sim 0.5\%$.

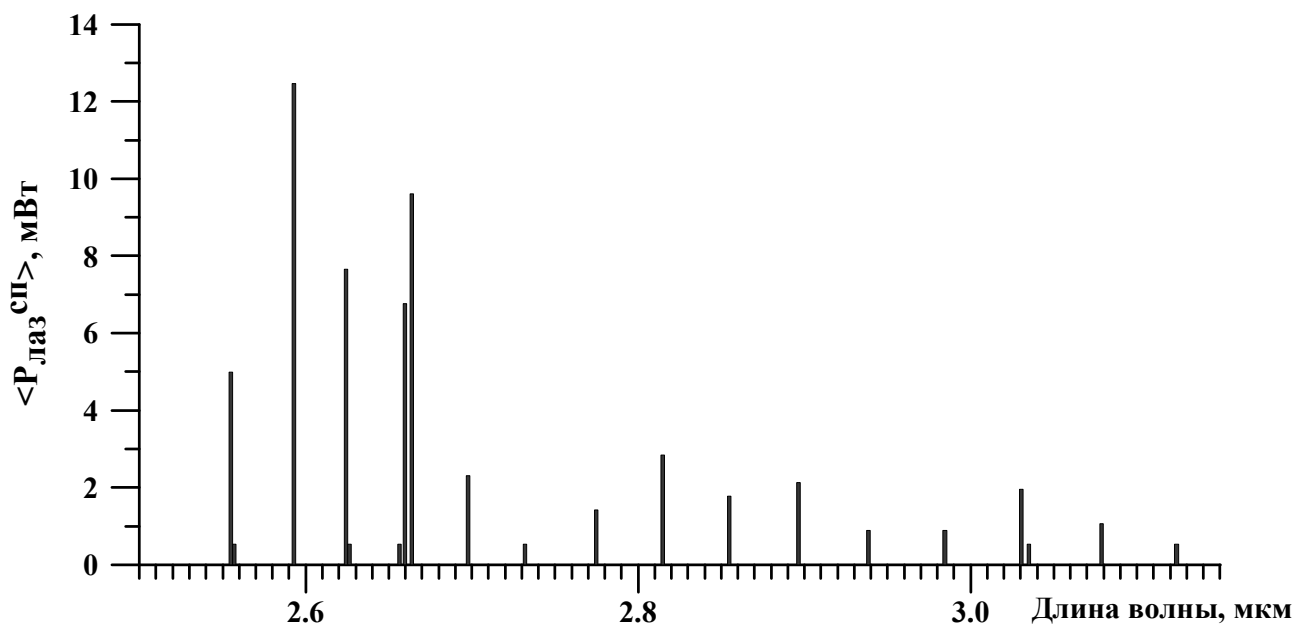


Рис.26. Спектр свободной многочастотной генерации обертонового щелевого СО лазера с импульсно-периодической ВЧ накачкой. $F_{\text{мод}}=500$ Гц, $\tau/T_{\text{мод}}=0.05$, СО:Воздух:Не=1:1:10, давление 22 Тор.

В этих экспериментах мощность излучения с длиной волны более 4 мкм (люминесценция и/или генерация на основных переходах молекулы СО), поглощенная в пластине из ИК кварца, составляла не более 20-30 мВт.

Дальнейшие исследования обертонового щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением будут направлены на оптимизацию его режимов работы для повышения его выходной мощности и эффективности, а также на максимальное расширение его рабочего спектрального диапазона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан компактный щелевой СО лазер с накачкой импульсно-периодическим емкостным ВЧ разрядом и криогенным охлаждением электродов. Проведено параметрическое исследование этого лазера, работающего на колебательно-вращательных переходах основной полосы ($V \rightarrow V-1$) молекулы СО. Определены оптимальные условия работы лазера (состав и давление газовой смеси, параметры ВЧ накачки) в режиме свободной многочастотной генерации. Максимальная полученная в экспериментах средняя мощность лазера составила ~ 12 Вт, а его КПД достигал $\sim 14\%$. Впервые реализован частотно-селективный режим работы криогенного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением. Одночастотная генерация была получена на ~ 100 лазерных линиях в спектральном диапазоне 4.9-6.5 мкм со средней выходной мощностью от нескольких единиц до нескольких десятков милливатт. Впервые была осуществлена работа щелевого ВЧ СО лазера на колебательно-вращательных переходах обертоновой полосы ($V \rightarrow V-2$) молекулы СО в спектральном диапазоне 2.5-3.1 мкм со средней выходной мощностью до 300 мВт. Все результаты были получены без принудительной замены газовой смеси. При фиксированных экспериментальных условиях стабильная генерация (с флуктуациями выходных характеристик не более $\pm 10\%$) была реализована на временном промежутке более одного часа, что позволяет говорить о том, что впервые осуществлен отпаянный режим работы криогенного щелевого СО лазера с ВЧ возбуждением.

Работа поддержана грантами РФФИ (проекты 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 также А.А.Коткову, Ю.М.Климачеву и О.А.Рулеву за помощь в подготовке экспериментов и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. A.A.Ionin. "Electric discharge CO lasers", in book 'Gas Lasers', ed. M.Endo, R.Walter, (CRC Press - Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, USA) p.201 (2007).
2. Н.Г.Басов, А.А.Ионин, А.А.Котков, и др. "Импульсный лазер на первом колебательном обертоне молекулы СО, действующий в спектральном диапазоне 2.5 - 4.2 мкм. 1. Многочастотный режим генерации". *Квантовая электроника*, **30**(9), 771 (2000).
3. Н.Г.Басов, А.А.Ионин, А.А.Котков, и др. "Импульсный лазер на первом колебательном обертоне молекулы СО, действующий в спектральном диапазоне 2.5 - 4.2 мкм. 2. Частотно-селективный режим". *Квантовая электроника*, **30**(10), 859 (2000).
4. O.G.Buzykin, A.A.Ionin, S.V.Ivanov, et al., "Resonant absorption of first-overtone CO laser radiation by atmospheric water vapor and pollutants", *Laser and Particle Beams*, **18**, 697 (2000).
5. G.N.Pearson, D.R.Hall. "Carbon monoxide laser excited by radio-frequency discharge". *Appl. Phys. Lett.*, **50** (18), 1222-1224 (1987).
6. H.Zhao, H.J.Baker, D.R.Hall. "Area scaling in slab RF-excited carbon monoxide lasers". *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 1281 (1991).
7. A.D.Colley, F.Villarreal, H.J.Baker, D.R.Hall. "High brightness slab waveguide carbon monoxide laser". *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 2916 (1994).
8. A.D.Colley, F.Villarreal, A.A.Cameron et al. "High power CW molecular gas laser using narrow gap slab waveguides". Gas Laser – Recent Developments and Future Prospects. Edited by W. J. Witteman and V. N. Ochkin. *NATO ASI Series 3: High Technology*, **10**, 89 (1995).
9. D.R.Hall, H.J.Baker. "Diffusion-cooled large surface area CO₂/CO lasers". *Proc. SPIE*, 2502, 12-19 (1995)
10. И.Г.Веснов, С.И.Мольков, В.А.Степанов, Е.Ф.Шишканов. "Оптимизация теплового режима в высокочастотных СО₂ лазерах с плоскими электродами большой площади". *Квантовая электроника*, **27** (1), 55-56 (1999).
11. X.Jianguo, Z.Wang, J.Wentao. "Radio frequency discharge excited diffusively cooled kilowatt carbon monoxide slab waveguide laser with a three mirror resonator". *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 1369 (1999).
12. А.И.Дутов, И.Ю.Евстратов, В.Н.Иванова и др. "Экспериментальное исследование и численное моделирование щелевого волноводного СО₂-лазера с высокочастотной накачкой". *Квантовая электроника*, **23** (6), 499-503 (1999).

13. E.F.Plinski, J.S.Witkovski, K.M.Abramski. "Algorithm of RF-excited slab-waveguide laser design". *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 1823-1826 (2000).
14. V.M.Cherezov, V.V.Kyun, V.N.Ochkin, et al. "Trends in the creation of small-sized CO₂ lasers". *Proc. SPIE*, **4644**, 275 (2002).
15. M.Uehara, H.Kanazawa, K.Kasuya. "Recent studies of high power CO laser under room temperature operation". *Proc. SPIE*, **2502**, 38 (1995).
16. В.Бон, Х.фон Бюлов, Ш.Дасс, А.А.Ионин, и др. "Мощный сверхзвуковой СО-лазер на основных и обертоновых переходах." *Квантовая электроника*, **35**(12), 1126 (2005).
17. H.von Bülow, E.Zeifang. "Supersonic CO laser with RF excitation", *Rev. Sci, Instr.*, **64**, 1764, (1993).
18. W.Urban. "Physics and spectroscopic applications of carbon monoxide lasers, a review". *Infrared Phys. Technol.*, **36** (1), 465 (1995)
19. J.Reilly. *Private communication*.
20. W.Solomon, D.Carroll. *Private communication*.