

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**



*имени
П. Н. Лебедева*

Ф И А Н

ПРЕПРИНТ

24

Н.П. ВАГИН, А.А. ИОНИН, О.А. РУЛЕВ,
Л.В. СЕЛЕЗНЕВ, Д.В. СИНИЦЫН, Н.Н. ЮРЫШЕВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
РЕАЛИЗАЦИИ ИМПУЛЬСНОГО РЕЖИМА
КИСЛОРОДНО-ИОДНОГО ЛАЗЕРА
С ЛЕКТОРАЗРЯДНЫМ ИСТОЧНИКОМ
СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА**

МОСКВА 2007

Исследование возможности реализации импульсного режима кислородно-иодного лазера с электроразрядным источником синглетного кислорода.

Н.П. Вагин, А.А. Ионин, О.А. Рулев,
Л.В. Селезнев, Д.В. Сеницын, Н.Н. Юрышев

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Ленинский проспект 53

**Research of an opportunity of realization
pulse mode oxygen-iodine laser
with electro-discharge source of singlet oxygen.**

N.P.Vagin, A.A.Ionin, O.A.Rulev,
L.V.Seleznev, D.V.Sinitsyn, N.N.Yuryshev

P.N.Lebedev Physical Institute, Leninsky pr., 53, Moscow, 119991, Russia

1. Введение

Успехи, достигнутые к настоящему времени в разработке электроразрядных источников синглетного кислорода (СК) [1], позволяют получать величину содержания последнего $Y = [\text{O}_2(^1\Delta_g)] / [\text{O}_2(^1\Delta_g) + [\text{O}_2(^3\Sigma_g)]$, где $[\text{O}_2(^1\Delta_g)]$ и $[\text{O}_2(^3\Sigma_g)]$ – концентрация синглетного кислорода и кислорода в основном состоянии, соответственно, более 20 % [2]. Это значение превышает величину порогового содержания, необходимую для получения положительного усиления в активной среде кислородно-иодного лазера при комнатной температуре ($Y = 15\%$). Ясно, что значение содержания, необходимое для получения генерации превышает это значение, поскольку величина усиления активной среды лазера должна иметь конечную величину, превышающую значение потерь. Однако, достигнутые к настоящему времени коэффициенты усиления слабого сигнала в активной среде кислородно-иодного лазера с электроразрядными источниками синглетного кислорода (СК) крайне малы. Поэтому для получения генерации в непрерывном режиме используются уникальные зеркала с низким уровнем потерь и высоким отражением, достигающим 99,9949% [3].

Коэффициент усиления G активной среды кислородно-иодного лазера равен

$$G = \sigma \cdot I_{total} \cdot \frac{(2K_{eq}+1) \cdot (Y - \frac{1}{2K_{eq}+1})}{2[(K_{eq}-1)Y+1]}, \quad (1)$$

где σ – сечение усиления, I_{total} – полная концентрация атомов иода, $K_{eq} = 0,75 \exp(400/T)$ – константа равновесия реакции обмена энергией между атомом иода и синглетным кислородом. Как видно, он определяется величиной содержания СК в активной среде, концентрацией иода и, через константу равновесия, температурой. Изменение первого параметра в сторону увеличения проблематично. В то же время концентрацию атомарного иода можно изменять в широких пределах, используя метод объемной импульсной генерации иода. Суть метода состоит в смешении потока, содержащего синглетный кислород, с иодидом (например, CH_3I , CF_3I) и последующим быстрым разложением последнего с образованием свободных атомов иода. Для такого разложения может быть использован фотолиз, импульсный разряд. Такой подход хорошо зарекомендовал себя при использовании химических генераторов СК, позволяя варьировать коэффициент усиления активной среды, длительность и, следовательно, мощность генерируемых импульсов лазерного излучения. В экспериментах с фотолитическим

иницированием была достигнута концентрация атомарного иода порядка 10^{15} см^{-3} , что заметно превышает уровень, достигнутый в экспериментах по реализации непрерывного кислородно-иодного лазера с электроразрядным генератором СК. Так в [4] использовалась смесь $3 \text{ O}_2 : 18 \text{ He} : 0,15 \text{ NO} : 0,008 \text{ I}_2$ при суммарном давлении 12,6 Тор в дозвуковой части и 1,55 Тор в сверхзвуковой части, т.е. в области резонатора. Отсюда следует, что концентрация атомарного иода в дозвуковой части не могла превышать $3 \cdot 10^{14}$ см^{-3} , а в сверхзвуковой почти на порядок меньше.

Помимо ожидаемого увеличения концентрации атомов иода в активной среде кислородно-иодного лазера метод объемного импульсного инициирования позволил бы реализовать режим импульсной генерации, обеспечивающий высокую мощность лазерного импульса при относительно невысокой средней мощности. Такая особенность работы лазера была бы привлекательной для расширения области его применения.

Однако, в отличие от ситуации с химическим генератором СК, использование электроразрядного генератора приводит к определенным проблемам, без решения которых использование метода объемной генерации атомов иода бесперспективно. Прежде всего, это связано с наличием атомарного кислорода в потоке кислорода из разряда. Как известно, атомарный кислород довольно быстро реагирует с такими иодидами как CF_3I , CH_3I [5]. И если с последним атомарный кислород рождает массу различных соединений, то в случае CF_3I основным продуктом является IO



Константа скорости процесса (2) довольно велика $K_2 = 5,8 \cdot 10^{-12}$ $\text{см}^3 \text{ с}^{-1}$ [6], хотя и уступает таковой для I_2 ($K = 1,4 \cdot 10^{-10}$ $\text{см}^3 \text{ с}^{-1}$ [7]). Образующиеся комплексы IO, в свою очередь, с константой скорости $K_3 = 1,5 \cdot 10^{-10}$ $\text{см}^3 \text{ с}^{-1}$ реагируют с атомами кислорода с образованием свободных атомов иода [7].



Несмотря на появление нестабильности при образовании атомов иода в среде, содержащей СК, не они являются источником неприятности. Как показывает эксперимент, значительная часть образовавшихся атомов осаждается на стенке реакционного объема вблизи места инъекции, образуя коричневую пленку. Представляется, что ниже по потоку от места смешения не атомы иода являются основными релаксантами синглетного кислорода. Гораздо более существенным оказывается влияние радикалов CF_3O_2 . Этот радикал образуется в три-

молекулярном процессе (4), идущем с константой скорости $K_4 = 1,9 \cdot 10^{-29} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$ ($K_4 = 1,8 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ в приближении высокого давления) [8].

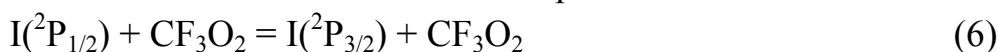


Для радикала CH_3 константа скорости процесса (4) равна $K_4 = 1,0 \cdot 10^{-30} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$ ($K_4 = 4,5 \cdot 10^{-14} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ в приближении высокого давления) [9].

Как было показано в [10], радикал CF_3O_2 является сильным тушителем как СК, так и возбужденных атомов иода. Константа скорости релаксации синглетного кислорода в процессе

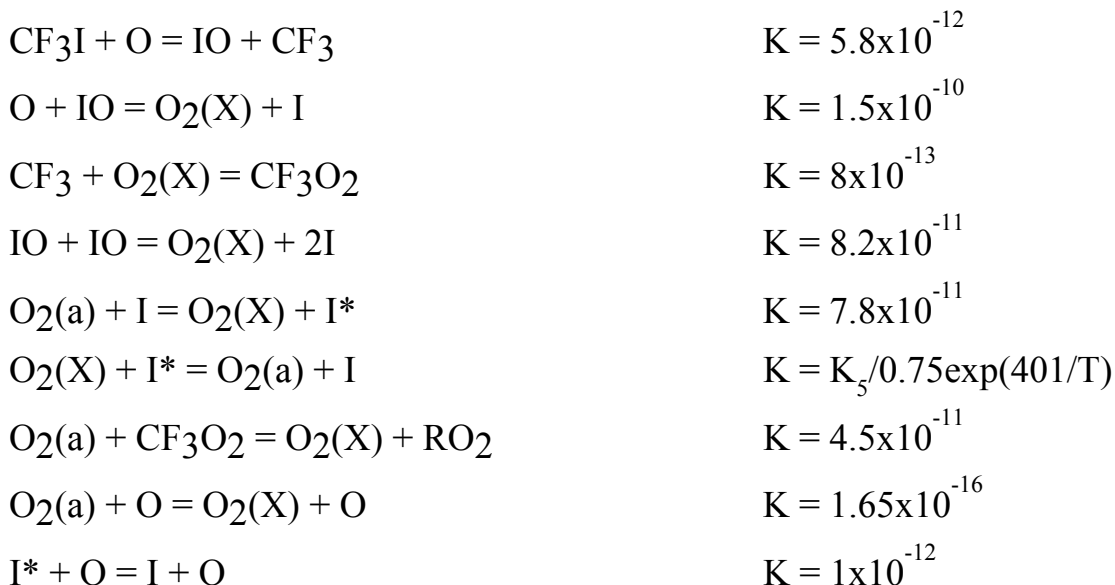


измеренная в [10], равна $K_5 = 4,5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$, а константа скорости релаксации возбужденного состояния атомов иода в процессе



$$- \quad K_6 = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}.$$

Влияние процессов (5) и (6) в силу их высокой скорости может привести к потере содержания СК по мере формирования активной среды, т.е. по мере заполнения лазерной кюветы. С целью оценки влияния этого эффекта была разработана численная модель, учитывающая процессы, существенные для поведения концентрации СК.



Применив модель для анализа поведения концентрации СК в смеси состава $[\text{O}_2] = 1,5 \cdot 10^{16}$, $[\text{CF}_3\text{I}] = 1,5 \cdot 10^{16}$, $[\text{O}] = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, $Y = 0,2$, характерного для условий эксперимента [10], легко получить, что за время порядка $5 \cdot 10^{-4}$ сек концентрация падает практически до нуля (рис.1).

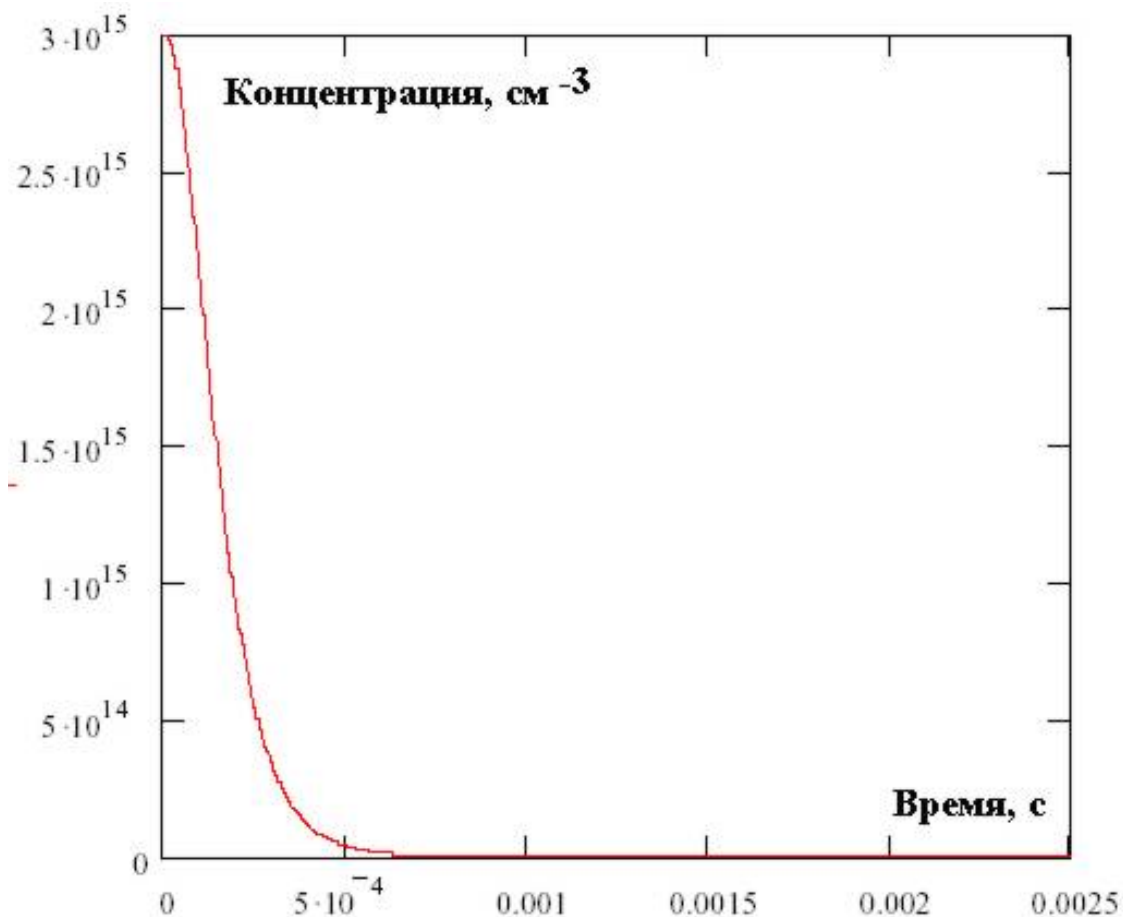
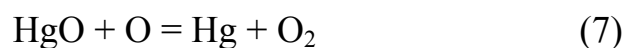


Рис.1. Поведение концентрации СК при начальной концентрации атомарного кислорода $[O] = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$

При объемной скорости откачки 20 л/с линейная скорость потока в реакторе с внутренним диаметром 22 мм равна 52,6 м/с. Таким образом, на длине порядка 2 см происходит почти полная потеря СК. Вариация начальной концентрации атомарного кислорода позволяет сделать вывод о необходимости снижения концентрации атомов кислорода более чем на два порядка, т.е. до уровня $[O] = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. В этом случае за время заполнения реактора 0,01 сек концентрация СК падает с $[O_2(^1\Delta_g)] = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $[O_2(^1\Delta_g)] = 1,9 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Содержание СК падает при этом с 20 до 12,6 %, (рис.2) т.е. до уровня, еще превышающего пороговый при температуре «сухого льда», используемого для охлаждения активной среды ($T = 195\text{K}$, $Y = 8\%$).

Таким образом, удаление атомарного кислорода из потока становится одной из основных задач для реализации импульсного режима кислородно-иодного лазера с объемной генерацией атомарного иода в активной среде. Использование гетерогенного процесса



и гомогенного



является эффективным методом снижения концентрации атомарного кислорода, однако достижение указанной выше концентрации $[\text{O}] = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ представляет собой задачу, решение которой неочевидно и требует экспериментального подтверждения. С этой целью предлагается моделирование активной среды путем использования химического генератора СК с добавлением в него продуктов, образующихся в кислороде под действием электрического разряда.

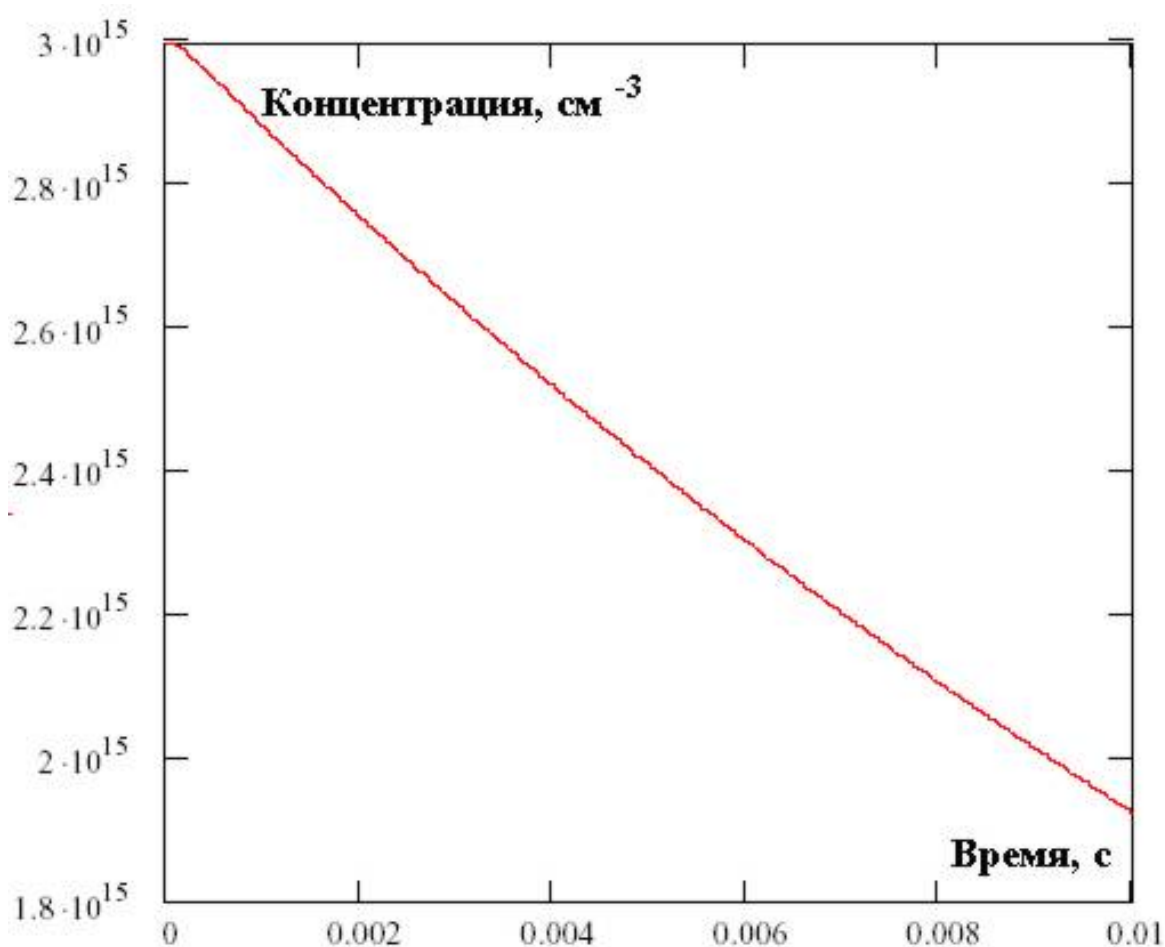


Рис. 2. Поведение концентрации СК при начальной концентрации атомарного кислорода $[\text{O}] = 1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка для исследования возможности реализации метода объемной генерации атомов иода для инициирования импульсного ки-

слородно-иодного лазера с электроразрядным генератором синглетного кислорода (ГСК) позволяла работать как с электроразрядным ГСК так и химическим. Такая возможность позволяла выявить специфику работы электроразрядного ГСК и найти пути борьбы с негативными факторами. Схема эксперимента (рис. 3) аналогична использованной в [11].

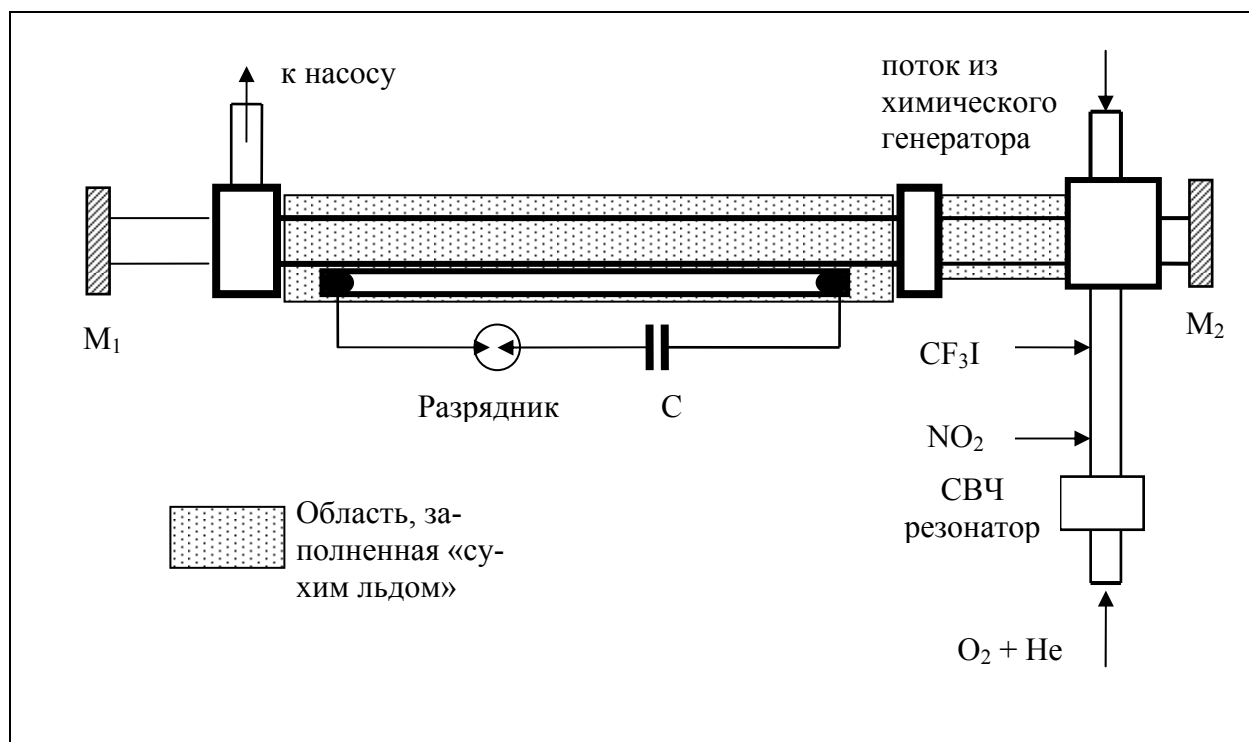
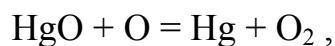


Рис.3. Схема эксперимента

Поток газов из химического генератора синглетного кислорода включал чистый азот, в случае сухого (не залитого рабочим раствором) генератора. С залитым раствором- азот с тем же расходом, химически полученный кислород с долей синглетного, и пары воды, давление которых в лазерном объеме определялось температурой раствора, и низкотемпературной ловушкой, расположенной ниже по потоку от газогенератора. Температура стенок ловушки поддерживалась спиртом, охлажденным до $-70 \dots -60^{\circ}\text{C}$ с помощью жидкого азота.

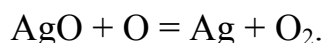
Смесь дополнительного кислорода с гелием подавалась в лазерный объем по кварцевой трубке диаметром 12 мм, проходящей через четвертьволновый СВЧ резонатор, питаемый медицинским СВЧ генератором «Луч-58-1» мощностью до 150 Вт. Ниже по потоку от области разряда внутренняя поверхность кварцевой трубки покрывалась слоем окиси ртути HgO. Как известно, окись ртути служит эффективным поглотителем атомов кислорода в гетерогенном процессе



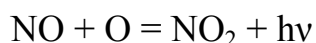
Более того, некоторые авторы полагают, что образующийся молекулярный кислород находится в возбужденном состоянии $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$, т.е. этот процесс является дополнительным источником синглетного кислорода.

Надо отметить, что применение пленки окиси ртути является нетехнологичным. Дело в том, что в процессе работы разряда пленка испаряется и перемещается ниже по потоку. Поэтому ее приходится постоянно освежать.

В ряде экспериментов для снижения концентрации атомарного кислорода ниже по потоку от резонатора внутрь трубки вставлялась прилегающая к стенке фольга, покрытая серебром. Под действием продуктов разряда серебро окислялось, образуя AgO . Как и окись ртути, окись серебра катализирует восстановление молекул кислорода из атомов, благодаря процессу



Эффективность удаления атомов кислорода серебряной фольгой весьма высока, однако уступает свеженапыленной пленке окиси ртути. Для получения возможности управлять концентрацией атомарного кислорода в большей степени, ниже по потоку предусмотрена инжекция двуокиси азота, быстро удаляющей атомы кислорода в реакции (8). Образование в результате этой реакции окиси азота приводит к появлению хемиллюминесценции, возникающей в результате реакции фоторекомбинации [12]



При этом наблюдается белесое свечение, интенсивность которого пропорциональна произведению концентраций атомов кислорода и окиси азота. Когда концентрация добавленной двуокиси азота достаточна для полного удаления атомов кислорода из потока, свечение исчезает. Таким образом, мониторинг свечения позволяет, в некоторой степени, судить о наличии атомов кислорода в потоке.

Еще ниже по потоку находится инжектор CF_3I . Такая последовательность инжекторов обусловлена необходимостью введения иодида в смесь, свободную от атомарного кислорода.

Приготовленная смесь нужного состава поступает в лазерную кювету, представляющую собой трубку из кварца КУ-1 внешним диаметром 24 мм, где подвергается импульсному воздействию УФ излучения лампы ИПП-250-13, питаемой от конденсатора $C = 0,8$ мкФ, заряжаемого до 22 кВ. Сборка лампы-лазерная кювета оборачивалась алюминиевой фольгой для увеличения эффективности использования излучения лампы.

Область инициирования и секция, расположенная выше по потоку, окружены кожухом из поролонa, внутрь которого засыпается сухая углекислота для охлаждения потока и, следовательно, снижения уровня порогового содержания СК. Длина охлаждаемой части составляла 50см, из них 20 см верх по потоку от начала светящейся части лампы.

Система газоподготовки обеспечивала приготовление газовых смесей необходимых составов и их подачу с контролируемым расходом. Для контроля расходов использовались ротаметры различных типов и датчик давления ВДГ-1. Для обеспечения стабильности подачи газов в течение эксперимента смеси подавались из полиэтиленовых мешков. При этом давление на входе в ротаметры поддерживалось постоянным и равным атмосферному.

Резонатор лазера был образован двумя сферическими зеркалами, одно из которых являлось полностью отражающим, а пропускание другого выбиралось в зависимости от решаемой задачи.

3. Численная модель кислородно-иодного лазера с импульсной генерацией атомов иода.

Для анализа экспериментальных результатов необходима численная модель работы лазера. При описании работы импульсного кислородно-иодного лазера с объемной генерацией атомов иода учитывались следующие процессы

Процесс	Константа скорости, $\text{см}^{-3}\text{с}^{-1}$
1. $\text{RI} + h\nu = \text{R} + f\text{I}^* + (1-f)\text{I}$	$\text{K} = \text{K}_0 t(\exp-t/t_0)$
2. $\text{O}_2(^1\Delta) + \text{I} = \text{O}_2(^3\Sigma) + \text{I}^* + 3335.6 \text{ J/mole}$	$\text{K} = 7.8 \cdot 10^{-11}$
3. $\text{R} + \text{O}_2(^3\Sigma) = \text{RO}_2$	$\text{K} = 4.5 \cdot 10^{-14} \text{ CH}_3\text{I}$ $= 1.8 \cdot 10^{-12} \text{ CF}_3\text{I}$
4. $\text{I}^* + \text{H}_2\text{O} = \text{I} + \text{H}_2\text{O} + 90899 \text{ J/mole}$	$\text{K} = 2.0 \cdot 10^{-12}$
5. $\text{I}^* + \text{RO}_2 = \text{I} + \text{RO}_2 + 90899 \text{ J/mole}$	$\text{K} = 2.5 \cdot 10^{-11}$
6. $\text{O}_2(^1\Delta) + \text{RO}_2 = \text{O}_2(^3\Sigma) + \text{RO}_2 + 94234 \text{ J/mole}$	$\text{K} = 4.5 \cdot 10^{-11}$
7. $\text{O}_2(^1\Delta) + \text{I}^* = \text{O}_2(^3\Sigma) + \text{I} + 182000 \text{ J/mole}$	$\text{K} = 1.1 \cdot 10^{-13}$

Первый процесс описывает фотодиссоциацию иодида световым импульсом длительностью t_0 с амплитудой, характеризуемой параметром K_0 . Параметр f определяет эффективность образования атома иода в возбужденном состоянии в процессе фотодиссоциации. Для CF_3I $f = 0,9$, для CH_3I $f = 0,7$.

В схеме 1-7 приведены тепловые эффекты реакций для расчета температуры активной среды. В силу незначительности степени диссоциации концентрация иодида полагалась постоянной. При соответствующем выборе состава смеси модель описывает работу лазера в фотодиссоционном режиме. Сравнение экспериментальных результатов по измерению энергии импульса лазера в фотодиссоционном режиме с результатами счета позволило выбрать значения параметров t_0 и K_0 наиболее адекватно отвечающие экспериментальным результатам. В этих экспериментах одно из зеркал резонатора выбиралось с достаточно высоким пропусканием для, во-первых, обеспечения регистрируемого уровня выходной энергии лазера и, во-вторых, для минимизации неопределенности, обусловленной недостаточной точностью определения потерь в зеркалах резонатора. Наилучшее согласие с экспериментом наблюдалось при $K_0 = 2,45 \cdot 10^9$, $t_0 = 1,5 \cdot 10^{-6}$.

4. Результаты экспериментов и их обсуждение

Описанная модель была применена для определения эффективности охлаждения активной смеси. Для этого использовался химический генератор СК. В первых экспериментах отсутствовала охлаждаемая секция, расположенная выше по потоку от лампы инициирования и, кроме того, инъекция иодида осуществлялась через кольцевой инжектор, находящийся непосредственно перед лампой. При этом в генерации участвовала лишь центральная часть трубки диаметром 5 мм, что создавало большие трудности при юстировке лазера. Эксперимент проводился при давлении наработанного в химическом генераторе кислорода $P_{O_2} = 1,54$ Тора и парциальном давлении иодида $P_{RI} = 0.6$ Тора. Суть эксперимента сводилась к определению порогового содержания СК при комнатной температуре и при охлаждении активной смеси. В данном случае под пороговым содержанием подразумевается величина содержания СК, при которой в резонаторе с ненулевыми потерями возникает генерация. Это содержание соответствует значению усиления не просто положительному, но превышающему уровень потерь. Ясно, что оно выше обычно используемого значения $Y_{th} = \frac{1}{2\beta g q + 1}$. Для этого к химически наработанному кислороду, содержащему СК, добавлялся невозбужденный кислород до срыва генерации. Эксперимент, выполненный при комнатной температуре, необходим для определения содержания СК Y_0 , нарабатываемого в химическом генераторе. Величина Y_0 находилась из выражения

$$Y_{th300} = \frac{Y_0}{1 + \frac{M_{O2add}}{M_{Cl2}}}$$

где Y_{th300} – пороговое содержание СК при комнатной температуре Y_0 – содержание СК на выходе из химического генератора, M_{Cl2} , M_{O2add} – расход хлора и расход дополнительно инжектируемого кислорода, соответственно. Величина Y_{th300} определялась с помощью численной модели с применением полученных выше значений потерь и параметров инициирования оказалась равной $Y_{th300} = 0.182$. Отсюда следует $Y_0 = 0,278$. Аналогичная процедура выполнялась при охлаждении, только теперь находилось значение $Y_{th(T)}$ по известным значениям Y_0 , M_{Cl2} , M_{O2add} . Полученная величина оказалась равной $Y_{th(T)} = 0,17$. Далее в численной модели проводилось варьирование начальной температуры с целью нахождения пороговой температуры. Полученное значение $T = 278K$ было интерпретировано, как доказательство того факта, что в использованных экспериментальных условиях охлаждение не эффективно. Использование центральной части лазерной кюветы, в которой температура могла превышать температуру стенки, также работало в пользу такой интерпретации. Представлялось, что модернизация экспериментальной установки позволит достигнуть более глубокого охлаждения активной среды.

С целью более точного определения температуры газового потока были изготовлены термопарные датчики на основе спая медь-константан. Один из датчиков был подвижный и позволял измерять температуру газового потока на оси лазерной трубки в различных точках по длине лазерной секции. Другой датчик измерял температуру вблизи стенки ниже по потоку от секции инициирования. Термопарные датчики показали более низкие температуры газового потока.

В частности, при моделировании рабочего потока воздухом засыпка охладителя приводила к охлаждению до -10^0 С в точке, соответствующей началу секции инициирования. Как видно из распределения температуры потока по длине секции инициирования (Рис.4.) средняя температура активной среды заметно ниже значения, полученного по измерению порогов.

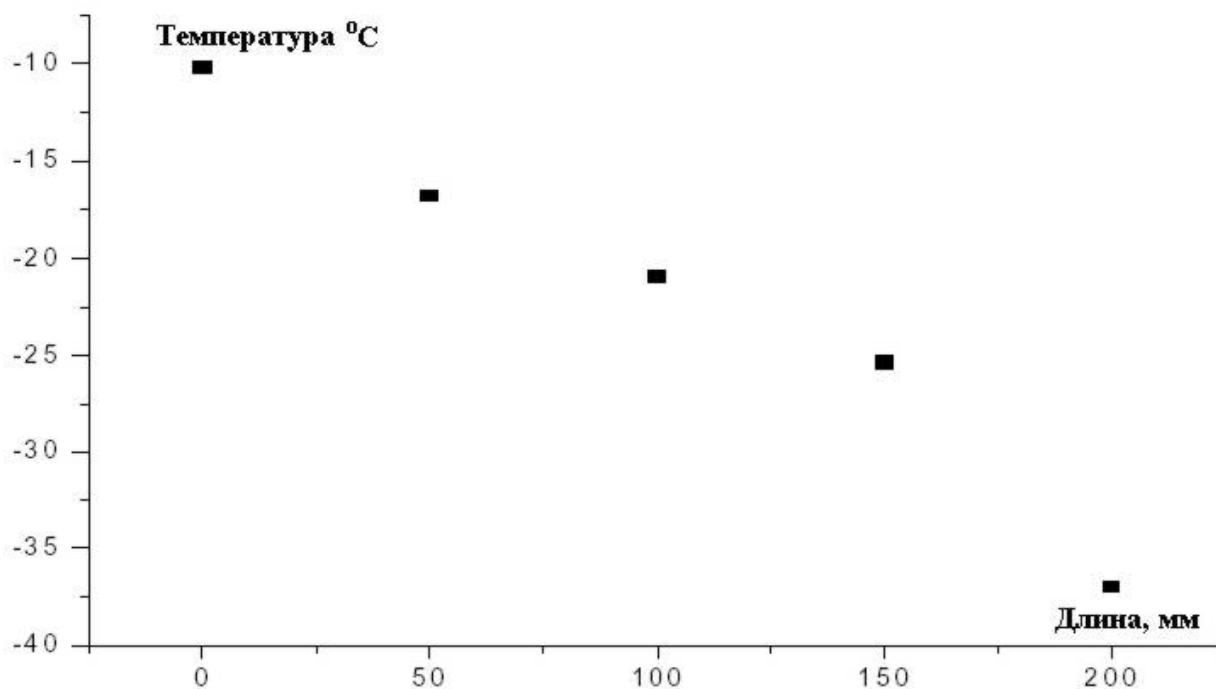


Рис. 4. Распределение температуры активной среды по длине секции иницирования

С целью улучшения эффективности охлаждения лазерной кюветы выше по потоку от нее была установлена дополнительная охлаждаемая секция длиной порядка 20 см.

Для более точного определения температуры активной среды была использована методика, заключающаяся в анализе зависимости выходных параметров фотодиссоционного йодного лазера (энергия, форма импульса) от плотности иодида в активной среде. Изменение плотности газов активной среды можно осуществить либо повышая давление при постоянной температуре потока, либо охлаждая газовый поток при сохранении давления. В предположении отсутствия влияния температуры на процессы, определяющие энергию лазера, сравнением характеристик лазера в режиме охлажденной активной среды и активной среды повышенного давления при комнатной температуре, можно сделать вывод о величине плотности активной среды, достигнутой при ее охлаждении и, тем самым, о ее температуре.

Процедура обработки экспериментальных данных заключалась в следующем. Экспериментально наблюдались импульсы лазерной генерации в потоке смеси He + CF₃I с различными давлениями иодида при комнатной температуре потока и при охлаждении стенок лазерной кюветы «сухим льдом». Осциллограммы оцифровывались, из интеграла интенсивности лазерной генерации по

времени вычислялась энергия лазерного импульса в соответствии с ранее проведенной калибровкой фотоприемника. Измерялась также и амплитуда импульса.

На рис.5 представлены зависимости параметров лазерного импульса от плотности (давления) иодида для комнатной температуры.

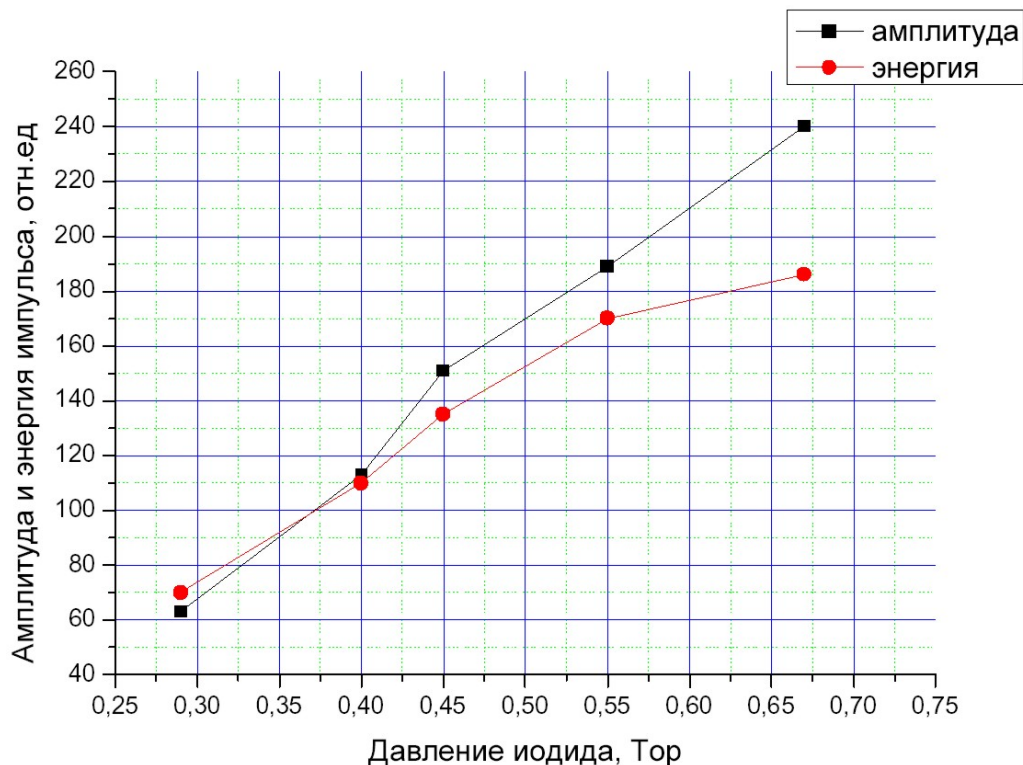


Рис.5. Зависимости параметров лазерного импульса от давления иодида для комнатной температуры.

Аналогичные зависимости были получены при охлаждении лазерной кюветы. Поскольку энергия импульса однозначно связана с плотностью иодида, то одинаковые энергии импульсов, полученные в экспериментах с охлаждением и без, соответствуют одинаковым плотностям иодида, но разным давлениям активной среды. Тогда температура охлажденной активной среды $T_{\text{охл}}$ находится из соотношения

$$T_{\text{охл}} = 300 \cdot (P_{\text{охл}} / P_{\text{комн}}),$$
 где $P_{\text{охл}}$ и $P_{\text{комн}}$ — соответствующие одинаковой энергии импульса давления иодида при охлаждении и комнатной температуре, соответственно. Для трех значений давлений получены значения температуры 193К, 210К и 200К. Таким образом, можно считать, что усредненная по длине охлаждения температура газового потока в условиях эксперимента (давления смеси=1.5-2Тор, скорость откачки=22-24л/сек) составляет $200 \pm 10\text{К}$.

Как видно, введение дополнительной секции охлаждения позволили заметно увеличить эффективность охлаждения активной среды лазера. С модерни-

зированной системой охлаждения были повторены эксперименты по определению порогового содержания СК для комнатной температуры и для случая лазерной кюветы охлаждением «сухим льдом». На рис. 6 и 7 представлены результаты экспериментов и данные расчета по описанной выше числовой модели.

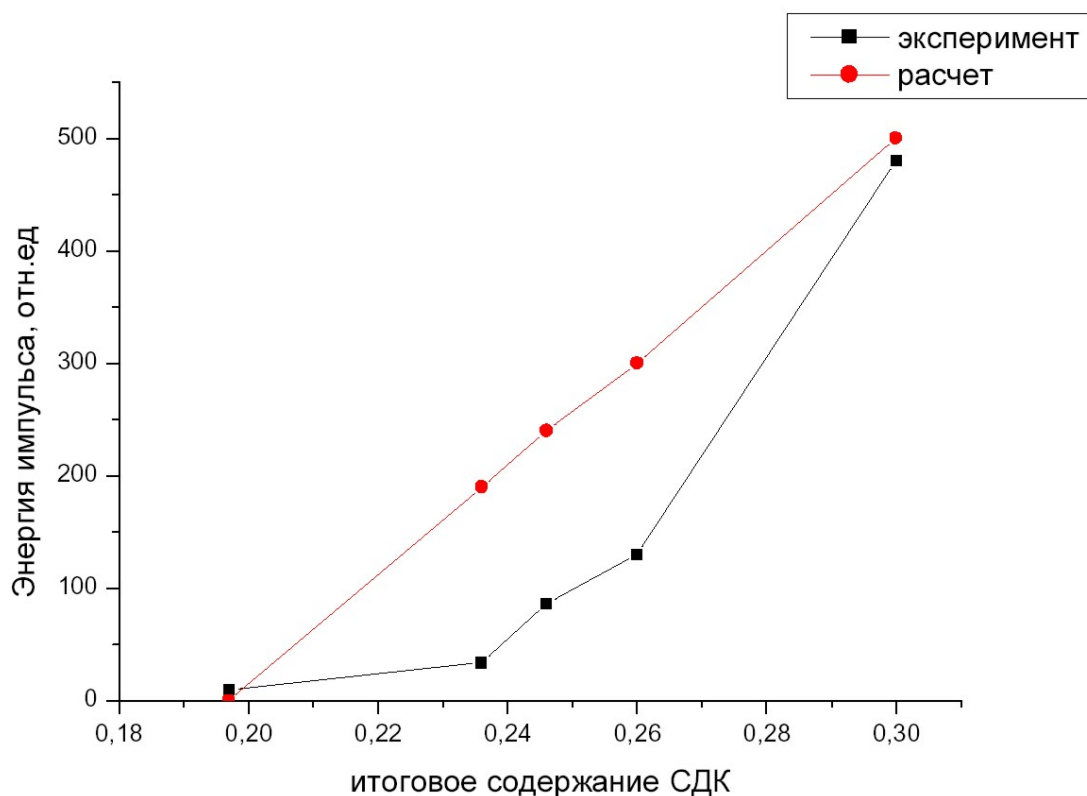


Рис.6. Влияние добавления невозбужденного кислорода на энергию импульса при комнатной температуре.

Для случая комнатной температуры и эксперимент, и расчет с удовлетворительной точностью дают значение содержания СК, при котором срывается генерация, $Y = 0.19$.

Совершенно другая ситуация наблюдается при охлаждении лазерной кюветы. В этом случае экспериментально полученное значение содержания СК, соответствующего началу генерации, равно $Y = 0.17$ при содержании на выходе ХГСК $Y = 0.3$. Полученное значение представляется слишком высоким.

Действительно, полагая, что температура активной смеси при охлаждении составляет, как и в экспериментах с охлаждением лазера, работающего в режиме фотодиссоциации, 200К, можно найти искомое значение содержания сравнением результатов экспериментов с охлаждением и без оногo. Срыв генерации при уменьшении содержания в реальных условиях происходит, когда усиление ста-

новится равным потерям. Полагая, что параметры резонатора не изменяются, можно утверждать, что срыв генерации происходит при одинаковом значении усиления слабого сигнала в активной среде. Из выражения (1) имеем для эксперимента для комнатной температуры $Y = 0,19$, $Y_{пор} = 0,15$. Для температуры 200К $Y_{пор} = 0,082$. Приравнивая выражения для коэффициента усиления для обоих случаев с учетом увеличенной в полтора раза концентрации атомов иода в случае охлаждения можно найти искомое значение содержания СК, при котором происходит срыв генерации при охлаждении. Это значение получается равным $Y = 0.095$, что заметно ниже полученного на эксперименте.

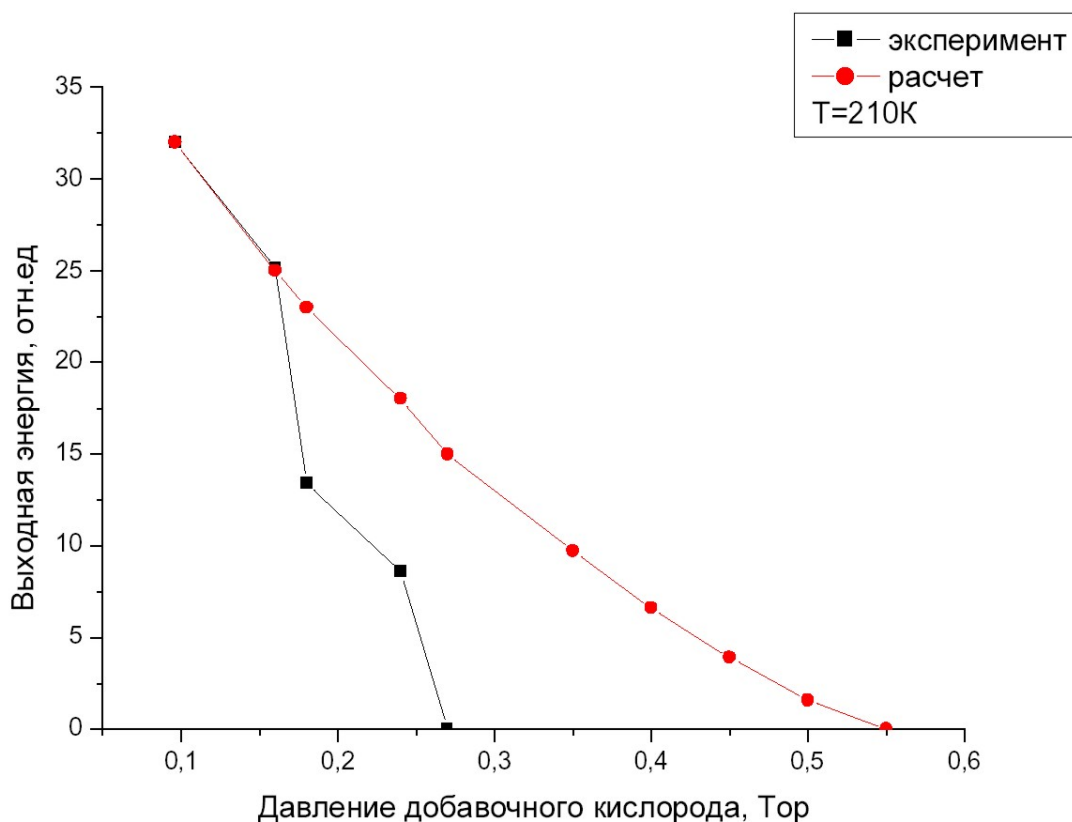


Рис.7. Зависимость энергии импульса от степени разбавления потока из химического ГСК невозбужденным кислородом для охлажденной смеси

Возникает вопрос о причине указанного явления. В принципе, таких причин может быть две. Первая, реальная температура смеси заметно выше измеренной. Вторая - при охлаждении снижается уровень инициирования, что приводит к уменьшению усиления. На наш взгляд, с учетом возможности наличия паров воды в активной среде, вторая причина является наиболее вероятной.

О наличии паров воды, являющейся эффективным тушителем возбужденного иода, в активной среде свидетельствует факт снижения энергии импульса лазера, работающего в фотодиссоционном режиме, при заливке ГСК. По сравне-

нию с сухим ГСК энергия импульса упала с $1,5 \times 10^{-4}$ до $0,95 \times 10^{-4}$ отн.ед. По-видимому, это связана с недостаточной эффективностью низкотемпературной ловушки. Очевидно, что пары воды с давлением выше насыщенного для температуры стенок кюветы порядка $-(60-70)^\circ\text{C}$ могут конденсироваться на стенке. Давление насыщенных паров составляет 10^{-3} и 10^{-2} Тор для температур $-74,7^\circ\text{C}$ и $-58,7^\circ\text{C}$, соответственно [13]. Содержание воды на таком уровне было зарегистрировано методом внутрирезонаторной спектроскопии на аналогичной установке при скорости откачки заметно ниже использованной в настоящих экспериментах. Ясно, что увеличение скорости откачки не способствует росту эффективности удаления паров воды в низкотемпературной ловушке.

Для подтверждения гипотезы об осаждении воды на стенках кюветы, снижающем уровень инициирования, был выполнен специальный эксперимент по наблюдению изменения уровня энергии импульса при охлаждении лазерной кюветы при заправленном рабочим раствором химическом ГСК. Уровень энергии лазерного импульса непосредственно перед началом охлаждения составил $1,19 \times 10^{-4}$ отн.ед.. После засыпки сухого льда энергия импульса падала с течением времени и установилась на уровне $0,75 \times 10^{-4}$ отн.ед. через примерно 20 минут. Предположив, что условия охлаждения идентичны тем, которые были при измерении температуры, можно полагать, что температура активной среды равна 200К. Тогда плотность иодида в зоне охлаждения должна быть в полтора раза выше. При линейной зависимости энергии импульса от плотности иодида для условий охлаждения следовало бы ожидать энергию импульса $1,78 \times 10^{-4}$ отн.ед.. Мы же имеем $0,75 \times 10^{-4}$ отн.ед. Таким образом, количество образованных в процессе фотодиссоциации возбужденных атомов иода в условиях работы с химическим генератором синглетного кислорода и охлаждением примерно в 2,4 раза ниже.

Используя описанную выше процедуру приравнивания усиления при комнатной температуре и охлаждении с учетом снижения в 2,4 раза концентрации иода в последнем случае, можно получить величину порогового содержания $Y = 0,11$, что далеко от значения, полученного на эксперименте. Однако для температуры активной среды $T = 230\text{K}$ указанная процедура дает значение порогового содержания для случая охлажденной активной среды $Y = 0,16$, что можно признать, с учетом конечной точности эксперимента, удовлетворительным согласием.

Таким образом, проведенные эксперименты, моделирующие работу импульсного кислородно-иодного лазера с электроразрядным ГСК, указывают на

возможность достижения порога генерации на существующей экспериментальной установке при содержании СК выше $Y = 0,11$, что достигается практически в любом электроразрядном ГСК. При этом поток из такого ГСК должен быть свободен от атомов кислорода.

Для выяснения влияния продуктов разряда на параметры лазерной генерации были проведены сравнения параметров лазерного импульса с включенным СВЧ генератором и без него. Результаты представлены на рис.8.

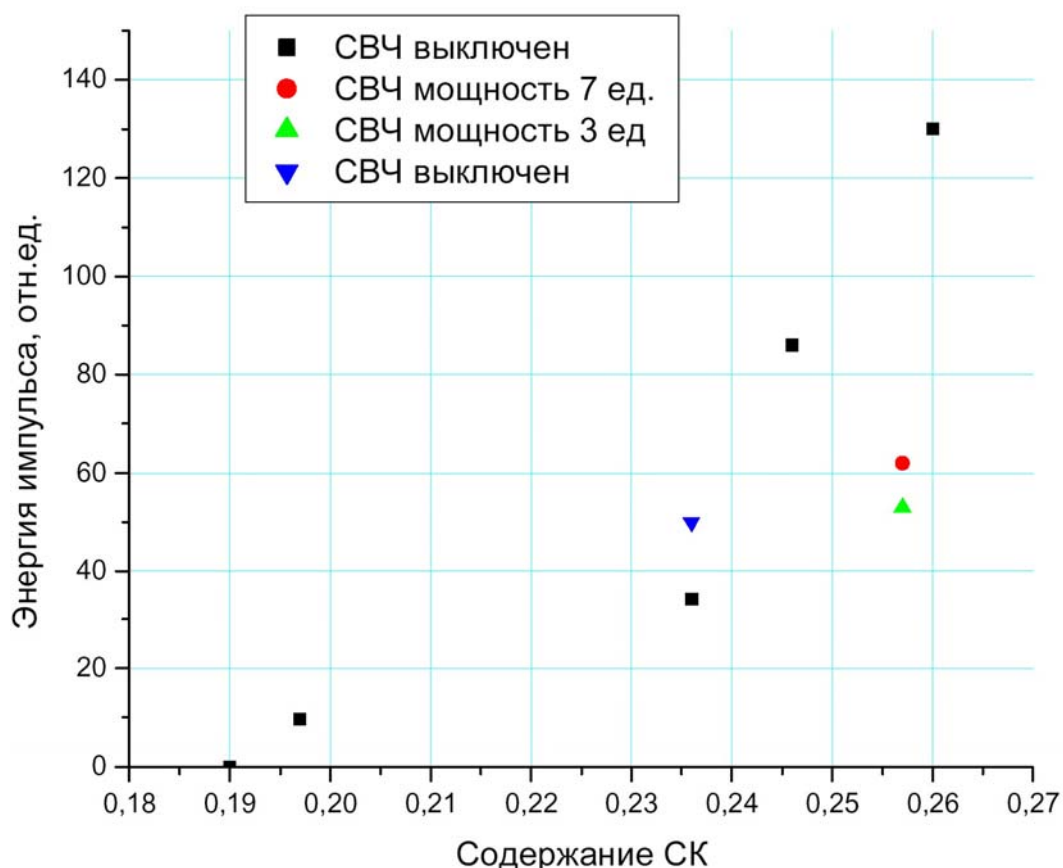


Рис.8. Влияние возбуждения в СВЧ разряде потока дополнительного кислорода на энергию лазерного импульса

При включении СВЧ разряда в потоке дополнительного кислорода образуется СК с содержанием $Y = 0.1 - 0.15$. Положим это значение для определенности $Y = 0.1$ В этом случае содержание СК после смешения потоков становится равным $Y = 0,257$ для расхода $O_{2 \text{ доп}} = 1,83$ Тор л/с. При таком содержании энергия импульса должна составлять, как видно из графика величину порядка 100 отн ед. Однако на эксперименте зарегистрирована энергия $E = 62$ отн.ед. При уровне мощности СВЧ генератора 3 ед энергия лазерного импульса составила 53 отн. ед., в то время как при соответствующем содержании СК она должна бы быть порядка в два раза выше. Разброс точек, соответствующих величине содержания СК $Y = 0,236$ характеризует воспроизводимость результатов. Пред-

положив, что содержание СК в потоке из СВЧ генератора более 10% мы обнаружим еще большее несоответствие. Таким образом можно сделать вывод, что в проведенном эксперименте в потоке из СВЧ генератора содержался не только синглетный кислород, но и продукты, приводящие к снижению усиления в активной среде. Как отмечалось выше, таким продуктом мог быть атомарный кислород. Откуда следует, что использование в наших условиях только пленки окиси ртути было недостаточно для удаления атомов кислорода до приемлемого уровня. Оптимизация активной среды с целью минимизации вредных примесей до приемлемого уровня будет темой будущих исследований.

5. Заключение

Проведенные эксперименты по моделированию работы кислородно-иодного лазера с электроразрядным генератором синглетного кислорода показали, что на созданной экспериментальной установке с резонатором, далеким от уникальных параметров, можно рассчитывать на получение генерации при содержании СК на выходе генератора свыше 11%. Несмотря на возможность достижения названного содержания СК в использованном электроразрядном ГСК на основе СВЧ разряда, генерация получена не была, что, по-видимому, обусловлено недостаточной эффективностью выбранного метода удаления атомов кислорода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта №05-02-17656-а

Литература

1. *A A Ionin, I V Kochetov, A P Napartovich, N N Yuryshev* // J. Phys. D: Appl. Phys. **40** (2007) R25–R61
2. *O V Braginsky, A S Kovalev, D V Lopaev, Yu A Mankelevich, O V Proshina, T V Rakhimova, A T Rakhimov and A N Vasilieva* // J. Phys. D: Appl. Phys. **39** (2006) 5183–5190
3. *D M King, D L Carroll, J T Verdeyen, J K Laystrom et al* // “Power Enhancement of the Hybrid ElectricOIL Laser”, 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA Paper 2006-3756
4. *D L Carroll, J T Verdeyen, D M King, et al* // “Recent Experiments with the ElectriCOIL Laser System”, 36th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, AIAA Paper 2005- 4915
5. *M K Gilles, A A Turnipseed, R K Talukdar, Y Rudich et al,* // J. Phys Chem. **100**, 14005-14015 (1996)
6. *D B Atkinson, J W Hudgents, and A J Orr-Ewing,* // J. Phys Chem. A **103**, 6173-80 (1999)
7. *W A Payne, R P Thorn, Jr., F L Nesbitt, and L J Stief,* // J. Phys Chem. A **102**, 6247-50 (1998)
8. *F Caralp, R Lesclaux, A M Dognon,* // Chem. Phys. Lett., **129**, 433 (1986)
9. *M Keiffer, M J Pilling, M J C Smith,* // J. Phys Chem., A **91**, 6026 (1987)
10. *Н.П. Вагин, В.А. Золотарев, П.Г. Крюков, В.С. Пазюк, Ю.П. Подмарьков, М.П. Фролов, Н.Н. Юрышев,* // «О влиянии донора йода на энергию генерации импульсного кислородно-йодного лазера», Квантовая электроника, **18**(1), 33 (1991).
11. *N. P. Vagin, A. A. Ionin, O. A. Rulev, L. V. Seleznev, D. V. Sinitsyn, and N. N. Yuryshev* // «Parametric study of SDO production in MW discharge by titration with iodide», доклад на конференции «Оптика лазеров 2006», С-Петербург, 2006.
12. *F Kaufman* // Proc. of the Royal. Soc. of London Series A, Mathematical and Physical sciences, **247**, #1248, 123-135, (1958)
13. Справочник химика, т.1, Ленинград, 1962