

На правах рукописи

Малышев Михаил Сергеевич

**МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ
АКТИВНЫХ СРЕД КИСЛОРОДНО-ЙОДНЫХ
ЛАЗЕРОВ**

01.04.01– Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Самара — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и Самарском филиале федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Научный руководитель:

Загидуллин Марсель Вакифович, доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты:

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»;

Решетов Владимир Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственный университет», профессор кафедры «Общая и теоретическая физика».

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», Институт лазерно-физических исследований, г. Саров

Защита состоится 12 декабря 2017 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу: 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»: http://ssau.ru/resources/dis_protection/malyshev/.

Автореферат разослан октября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.215.01

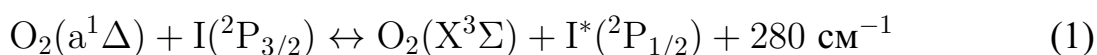
Ковалев А. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Перспективным направлением в разработке лазерных систем является поиск твердотельных, а в последнее время и газовых лазерных систем, способных осуществлять преобразование излучения множества лазерных диодов в когерентное лазерное излучение. Такими системами являются лазеры на парах щелочных металлов (Krupke W.F., 2012) и лазеры на благородных газа (Михеев П.А., 2015). Интерес к подобным системам связан с тем, что за последнее десятилетие созданы мощные и эффективные диодные лазеры, линейки и наборные матрицы на их основе, но качество их излучения заметно хуже дифракционного.

Синглетный кислород $O_2(a^1\Delta)$ является уникальной возбуждённой частицей с большим временем жизни ($\tau_{1/2} = 72$ мин.). При этом возможна быстрая передача энергии от молекул синглетного кислорода к атомам йода в процессе E–E обмена



с близкой к газокинетической константой скорости прямого процесса $k_f = 7,8 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ (Perram G.P., 1995). Ввиду данных особенностей, кислородно-йодная среда является перспективной для построения на её основе лазеров высокой мощности. В частности, был построен химический кислородно-йодный лазер (ХКИЛ) мегаваттного класса.

Однако, текущие реализации кислородно-йодного лазера имеют определённые проблемы. В химических кислородно-йодных лазерах $O_2(a^1\Delta)$ образуется в химическом генераторе, который для своей работы потребляет токсичные реагенты. Кислородно-йодные лазеры с образованием $O_2(a^1\Delta)$ в электрическом разряде имеют низкую эффективность. В связи с этим, актуальным является поиск новых способов накачки кислородно-йодной среды, одним из которых является оптическая накачка.

Ранее было предложено несколько способов оптической накачки кислородно-йодной среды, основанных как на непосредственной оптической накачке молекул кислорода (Neumann D.K., 2006, Бирюков А.С., 2008), так и на передаче возбуждения от молекул фотосенсибилизатора (Данилов О.Б., 2014). Возможно получение атомов синглетного кислорода посредством оптической накачки перехода $^2P_{3/2} - ^2P_{1/2}$ атомарного йода, с последующей передачей электронного возбуждения молекулам синглетного кислорода в процессе (1). Разумеется, в таком случае относительная доля синглетного кислорода сможет превысить равновесное значение только в случае резкого охлаждения среды.

Для разработки новых типов кислородно-йодных лазеров большое значение имеют точные значения констант скорости для процессов, протекающих в их активной среде. Одним из таких процессов является диссоциация

I_2 в присутствии синглетного кислорода. Механизм диссоциации слабо изучен в силу большого количества вовлечённых в него процессов. Известно, что данный механизм состоит из последовательности реакций, сопровождающихся передачей электронного возбуждения от молекул синглетного кислорода к молекулам и атомам йода (Perram G.P., 1995). Ключевой проблемой в данном случае является отсутствие измеренных констант скоростей реакций, что не позволяет выделить доминирующие каналы диссоциации.

Скорость диссипации запасённой в активной среде КИЛ энергии определяет необходимую интенсивность накачки. Основным каналом диссипации являются процессы дезактивации $O_2(a^1\Delta)$, следовательно исследование данных процессов представляет особую важность для активной среды КИЛ.

Для исследования процессов взаимодействия возбуждённых атомов и молекул в кислородно-йодно среде ранее использовались методы эмиссионной спектроскопии (Heidner R.F., 1983). Однако, в данной работе не удалось выделить иницирующую стадию процесса диссоциации йода. В связи с этим актуальной является разработка современных высокочувствительных методов измерения концентраций электронно-возбуждённых атомов, молекул и кинетики их взаимодействия.

Целью данной работы является измерение кинетических констант процессов в кислородно-йодной среде методами эмиссионной спектроскопии и разработка новых методов оптической накачки активной среды кислородно-йодного лазера.

Основные задачи диссертации:

1. Создать экспериментальную установку для измерения концентраций электронно-возбуждённых атомов, молекул и исследования кинетики их взаимодействия в кислородно-йодном потоке.
2. Разработать метод для исследования генерации молекул $O_2(b)$ в процессах $O_2(a) + O_2(a) \rightarrow O_2(b) + O_2(X)$, $O_2(a) + I^* \rightarrow O_2(b) + I$ и измерить их константы скорости.
3. Разработать метод диагностики потерь синглетного кислорода в процессах $O_2(a) + O_2(a) \rightarrow$ продукты, $O_2(a) + I^* \rightarrow$ продукты и измерить их константы скорости.
4. Экспериментально выделить иницирующую и цепную стадии диссоциации молекулярного йода в присутствии синглетного кислорода. Определить доминирующие процессы на иницирующей и цепной стадии диссоциации йода.
5. Разработать метод получения активной среды кислородно-йодного лазера путём оптической накачки перехода ${}^2P_{1/2} - {}^2P_{3/2}$ атома йода.

Научная новизна

1. Создана установка для измерения констант скоростей реакций с участием электронно-возбуждённых частиц путём измерения пространственной эволюции их концентраций в газовом потоке.

2. Определены константы скорости реакций:
 $O_2(a) + O_2(a) \rightarrow O_2(b) + O_2(X) - (4,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{с};$
 $O_2(a) + I^* \rightarrow O_2(b) + I - (2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с};$
 $O_2(a) + O_2(a) \rightarrow \text{продукты} - (10 \pm 2) \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{с};$
 $O_2(a) + I^* \rightarrow \text{продукты} - (6 \pm 1,1) \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с};$
3. Показано, что инициирование процесса диссоциации йода в активной среде кислородно-йодного лазера происходит преимущественно в реакции $O_2(b) + I_2 \rightarrow O_2(X) + 2I$ с константой скорости $(8,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}.$
4. Показано, что роль трёхчастичных взаимодействий $2O_2(a) + I_2 \rightarrow 2I + 2O_2(X)$ и $O_2(a) + I^* + I_2 \rightarrow 3I + O_2(X)$ а также процессов с участием колебательно-возбуждённого кислорода не дают значительного вклада на инициирующей и цепной стадиях диссоциации.
5. Предложен новый тип кислородно-йодного лазера, основанный на непосредственной накачке перехода ${}^2P_{3/2} - {}^2P_{1/2}$ атомарного йода в газовом потоке с последующим его газодинамическим охлаждением.
6. Показано, что при облучении смеси $O_2 - I_2$ излучением с длиной волны 1315 нм в среде начинает протекать диссоциация молекулярного йода и образуется синглетный кислород.

Практическая ценность.

Уточнённые значения констант скоростей реакций процессов, протекающих в активной среде КИЛ, являются необходимыми на стадии их разработки и проектирования. Полученные результаты закладывают основы для проектирования кислородно-йодных лазеров с оптической накачкой. Предлагаемая в данной работе схема оптической накачки для кислородно-йодного лазера является перспективной для различных применений и имеет ряд достоинств по сравнению с химическими и электрическими кислородно-йодными лазерами.

Достоверность представленных в диссертации полученных научных результатов подтверждается, с одной стороны, использованием апробированных методик измерения концентраций возбуждённых частиц при помощи абсолютно калиброванного спектрометра, использованием сертифицированных измерительных приборов, и, с другой стороны, корректной математической постановкой задач, надёжностью используемых общепринятых уравнений и моделей, а также удовлетворительным согласием результатов, полученных расчётным путём, с экспериментальными данными.

Защищаемые положения:

1. Метод измерения кинетических констант процессов с участием возбуждённых частиц, основанный на измерении пространственной эволюции их абсолютной концентрации в проточной трубке методами эмиссионной спектроскопии.
2. Измеренные значения констант скорости реакций:
 $O_2(a) + O_2(a) \rightarrow O_2(b) + O_2(X) - (4,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{с};$
 $O_2(a) + I^* \rightarrow O_2(b) + I - (2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с};$

$O_2(a) + O_2(a) \rightarrow \text{продукты} - (10 \pm 2) \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{с};$

$O_2(a) + I^* \rightarrow \text{продукты} - (6 \pm 1,1) \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с};$

$O_2(b) + I_2 \rightarrow O_2(X) + 2I - (8,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}.$

3. Метод фотоиндуцированной диссоциации йода и образования синглетного кислорода в среде O_2-I_2 под действием лазерного излучения с длиной волны 1315 нм.
4. Концепция кислородно-йодного лазера с оптической накачкой, основанная на предварительной диссоциации I_2 в потоке O_2-I_2 , оптической накачке перехода ${}^2P_{1/2}-{}^2P_{3/2}$ и последующем газодинамическом охлаждении потока.

Апробация работы. Основные результаты были представлены на следующих конференциях:

- High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam applications IX в рамках симпозиума "Photonics West 2016"(Сан-Франциско, США, 15.02.16–16.02.16)
- The 21th International Symposium on High Power Laser Systems and Applications (Гмунден, Австрия, 05.09.16–09.09.16)
- 16th, 17th International Conference "Laser Optics"(Санкт-Петербург)
- Вторая международная научно-техническая конференция «Динамика и виброакустика машин» (Самара, 15.09.14–17.09.14)
- V всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики (Москва, 10.11.13–15.11.13)
- Всероссийская молодёжная конференция «перспективы развития фундаментальных наук» (Москва, 01.07.11–11.07.11)
- IX, X, XI, XIII всероссийский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (Самара)
- Международная конференция с элементами научной школы для молодежи «Перспективные информационные технологии для авиации и космоса» (Самара, 29.09.10–01.10.10)

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 22 научных работы, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК России, 10 статей в изданиях, индексируемых в Web of Science и 17 работ в сборниках трудов и тезисов докладов международных, всероссийских и региональных конференций. По результатам диссертации был получен патент РФ №2548622.

Личный вклад. Все результаты, представленные в диссертационной работе, получены автором лично, либо в соавторстве при его непосредственном личном участии.

Связь с международными проектами и государственными программами. Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-00106 мол_а.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения и 1 приложения. Полный объем диссертации составляет 111 стра-

ниц, включая 43 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 146 наименований.

Содержание работы

Во **введении** определён объект исследований, проведён обзор литературы, обоснована актуальность выбранной темы, поставлена цель диссертации, сформулированы задачи, которые необходимо решить для ее достижения. Изложена научная новизна, представлены основные положения, выдвигаемые на защиту, и даны сведения о практической значимости работы.

В **первой главе** описана экспериментальная установка, используемая для исследования кинетики кислородно-йодной среды. Измерялась абсолютная спектральная светимость газового потока вдоль газопроточного канала в полосах переходов $a \rightarrow X$ и $b \rightarrow X$ молекулы кислорода и линии ${}^2P_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2}$ атома йода (рисунок 2). Затем, по интегральной светимости и известным значениям коэффициентов Эйнштейна для этих переходов определялись профили концентраций $O_2(a^1\Delta)$, $O_2(b^1\Sigma)$ и $I^*({}^2P_{1/2})$ вдоль потока. Корректность калибровки системы подтверждается измерением константы скорости димольного взаимодействия $O_2(a) + O_2(a)$, измеренное значение которой согласуется с известной величиной сечения димольного поглощения.

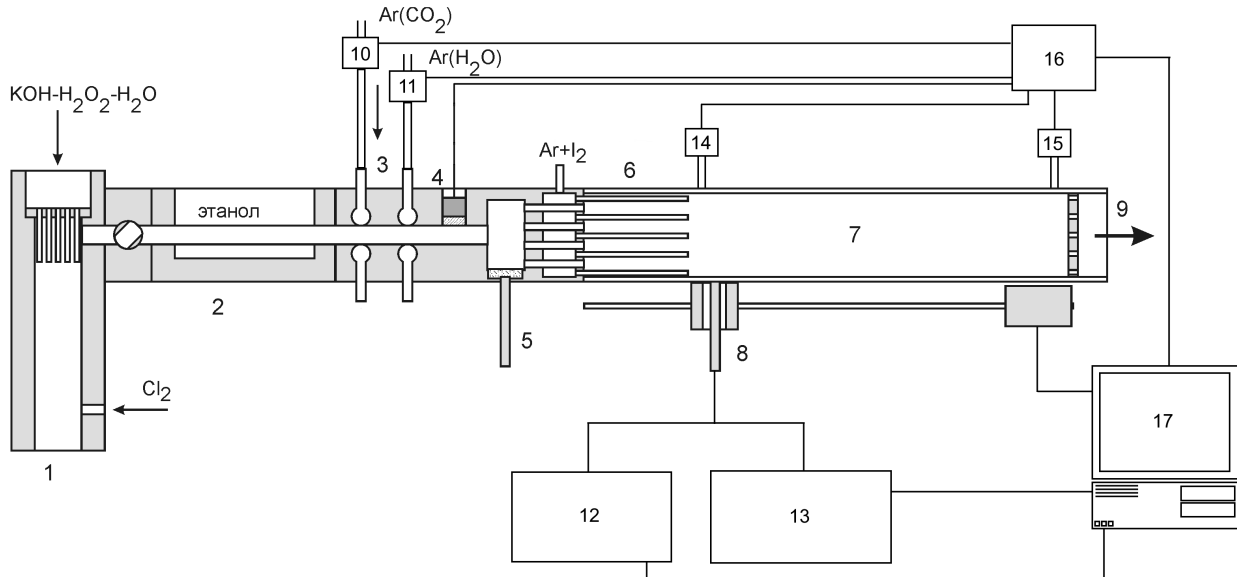


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки с газопоточной оптической диагностической секцией. 1 – ГСК, 2– ЛПВ, 3 – узлы смешения, 4 – германиевый детектор, 5 – приёмный конец волокна для ввода излучения в монохроматор, 6 – инжектор молекулярного йода, 7 – ОДС, 8 – подвижная каретка с приёмным концом волокна для ввода излучения в монохроматор, 9 – расходная шайба, 10, 11 – расходомеры, 12 – спектрометр M266, 13 – спектрометр Avantes-2048, 14, 15 – датчики давления, 16 – АЦП, 17 – ПК

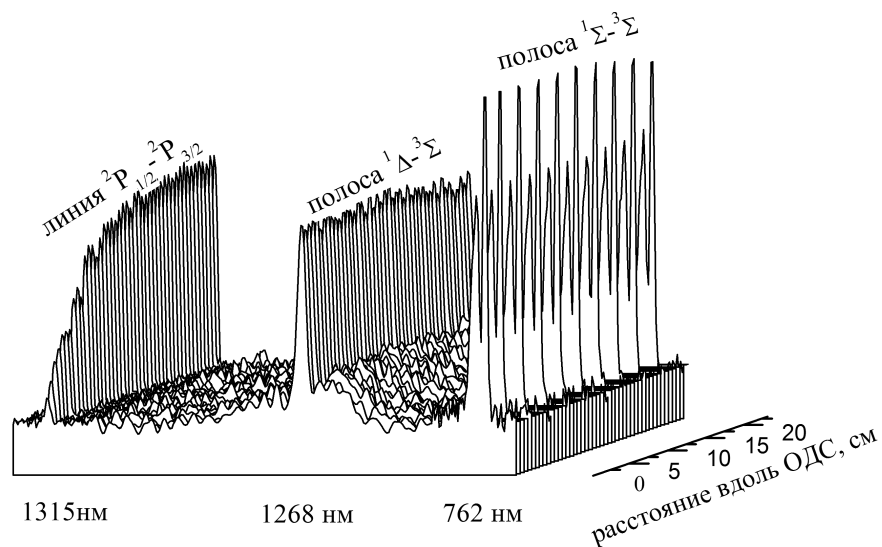


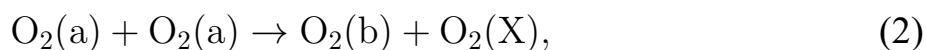
Рисунок 2 — Эволюция вдоль ОДС спектров излучения для полос ${}^1\Delta-{}^3\Sigma$, ${}^1\Sigma-{}^3\Sigma$ молекулярного кислорода и линии ${}^2P_{1/2}-{}^2P_{3/2}$ атомарного йода при малых концентрациях йода ($n_{I_2} < 10^{11} \text{ см}^{-3}$)

Источником $O_2(a)$ являлся химический генератор синглетного кислорода (ХГСК). Приёмный конец оптоволоконна двигался вдоль потока при помощи линейного транслятора. Дозирование расхода буферных газов (CO_2 , Ar) производилось при помощи электронных расходомеров. Скорость потока в канале контролировалась при помощи расходного отверстия в конце ОДС.

Для измерения температуры среды была разработана программа производящая синтез частично разрешённой вращательной структуры перехода $O_2(b) \rightarrow O_2(X)$ с последующим её сравнением со спектром полученным экспериментально. Погрешность данного метода измерения температуры составляет величину порядка 10 К.

Экспериментальная установка позволяла определять малые концентрации $I^*({}^2P_{1/2})$ порядка 10^{10} см^{-3} , концентрации $O_2(a^1\Delta)$ порядка 10^{15} см^{-3} и концентрации $O_2(b^1\Sigma)$ порядка 10^{11} см^{-3} . Закономерности изменения концентраций активных веществ вдоль газопроточной трубки и их взаимная зависимость при известной скорости газового потока позволяют определить константы скоростей для реакций с их участием.

Вторая глава посвящена определению констант скорости для процессов диссоциации молекулярного йода. Для реакций образования $O_2(b^1\Sigma)$



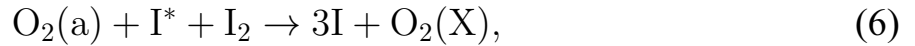
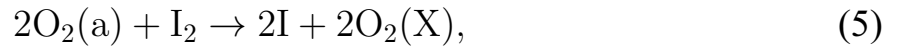
были получены значения констант скорости $k_{p1} = (4,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{с}$ и $k_{p2} = (2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$ соответственно.

Определение константы скорости для реакции диссоциации йода под действием $\text{O}_2(\text{b}^1\Sigma)$

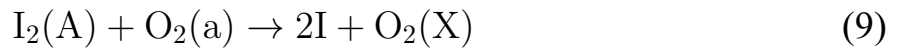
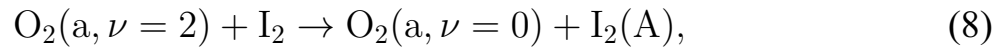
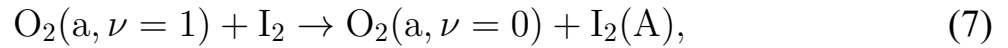


производилось при малых концентрациях йода ($n_{\text{I}_2} < 10^{11} \text{ см}^{-3}$), что соответствовало иницирующей стадии процесса диссоциации и способствовало исключению влияния иных каналов диссоциации йода. В итоге было получено значение константы скорости $k_d = (8,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$.

В ходе определения константы k_d проводились эксперименты при различной величине концентрации $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$. Было обнаружено что скорость диссоциации йода от концентрации $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$ не зависит. Это говорит о том, что вклад реакций трехчастичного взаимодействия

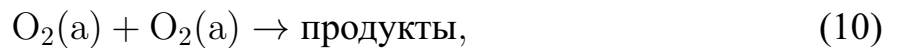


а также реакций с участием колебательно-возбуждённого кислорода



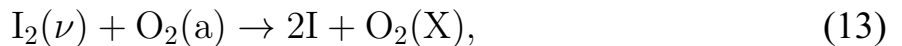
в процесс диссоциации йода пренебрежимо мал.

Поскольку концентрация синглетного кислорода $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$ является критическим параметром для активной среды кислородно-йодного лазера, были измерены константы скорости k_{q1} и k_{q2} процессов дезактивации:



Путём измерения падения концентрации $\text{O}_2(\text{a}^1\Delta)$ вдоль газопроточной трубки после полной диссоциации йода, для констант скоростей были получены значения $k_{q1} = (10 \pm 2) \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{с}$ и $k_{q2} = (6 \pm 1,1) \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}$.

Второй канал диссоциации йода включает в себя процессы



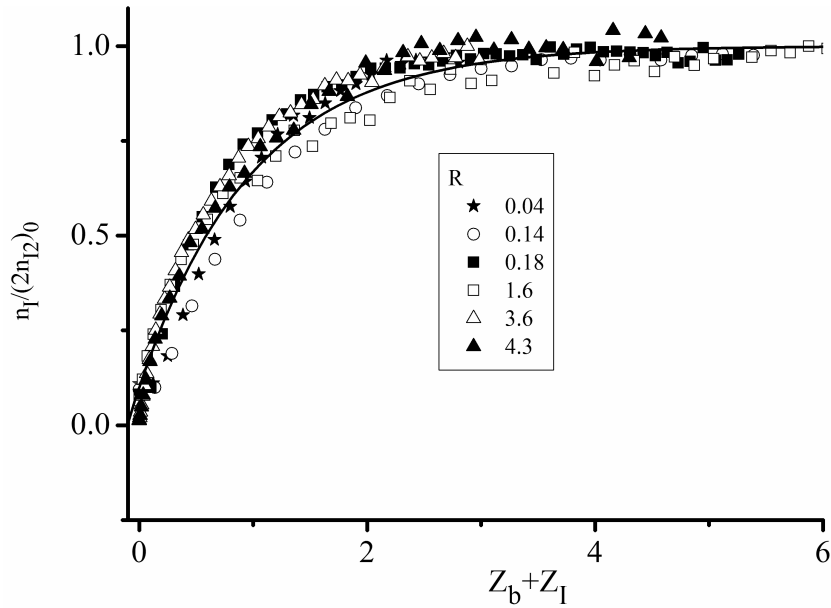


Рисунок 3 — Зависимости безразмерной концентрации атомов йода от параметра $Z_{O_2(b)} + Z_I$ при различных значениях R . Сплошная кривая — теоретическая зависимость $n_I(X)/(2n_{I_2}^0) = 1 - \exp(-(Z_{O_2(b)} + Z_I))$

где $I_2(\nu)$ есть колебательно-возбуждённая молекула йода. Теоретическая зависимость доли продиссоциировавшего йода с учётом второго канала диссоциации определяется выражением

$$n_I(X)/(2n_{I_2}^0) = 1 - \exp(-(Z_{O_2(b)} + Z_I)), \quad (15)$$

где $Z_{O_2(b)} = \frac{1}{V} \int_0^X k_d n_{O_2(b)}(X) dX$ и $Z_I = \frac{1}{V} \int_0^X k_\nu n_{I^*}(X) dX$.

Введём характеристический параметр $R = (k_\nu n_{I^*max}) / (n_{O_2(b)} k_d)$, где n_{I^*max} есть максимальная вдоль потока концентрация $I^*(^2P_{1/2})$, $n_{O_2(b)}$ — концентрация $O_2(b^1\Sigma)$, $k_\nu = 3,6 \cdot 10^{-11}$ см³/с (Burde D.H., 1976) — константа скорости процесса (12) при условии образования $I_2(\nu \geq 20)$ с вероятностью 100%. При $R \gg 1$ диссоциация йода происходит преимущественно в реакциях (12)–(14), при $R \ll 1$ — в реакции (4). Было подтверждено, что при использовании значения константы k_d для реакции (4), полученного в данной работе, экспериментальные данные сходятся с теоретическим предсказанием для большого диапазона значений параметра R , что показано на рисунке 3.

Молекулярный йод также может диссоциировать в процессах (7)–(9) и в процессе



Для того, чтобы показать, что вклад вносимый данными процессами пренебрежимо мал, были проведены эксперименты при различной величине доли $O_2(a)$ (Y), поскольку доля колебательно-возбуждённых молекул кислорода прямо пропорциональна Y^2 . Были проведены измерения при значениях $Y = 0,48$ и $Y = 0,18$, при этом различий скорости диссоциации в пределах погрешности обнаружено не было.

Также, активным дезактиватором колебательно-возбуждённого кислорода является молекула воды. Аналогично, проводились две серии экспериментов. В первой серии экспериментов, в поток подмешивались пары воды, во второй – количество CO_2 , достаточное для дезактивации молекул $\text{O}_2(b)$ с той же скоростью. В результате, между двумя сериями экспериментов не было обнаружено никаких различий в скорости диссоциации молекулярного йода.

Следовательно, можно сделать вывод что процесс диссоциации в исследованном нами диапазоне параметров описывается моделью предложенной в работе (Heidner R.F., 1983) с учётом уточнённых значений констант скоростей для реакций (2), (3) и (4).

Третья глава посвящена разработке схемы оптической накачки КИЛ, основанной на непосредственном возбуждении перехода тонкой структуры атомарного йода с последующим газодинамическим охлаждением потока.

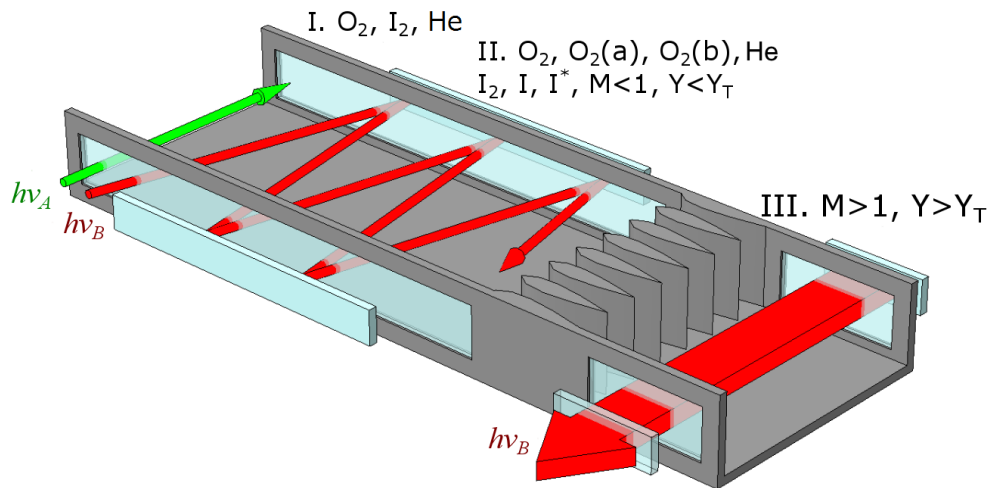


Рисунок 4 – Предлагаемая схема оптической накачки

Рассмотрим проточную трубку со смесью $\text{O}_2\text{-I}_2\text{-He}$ с соотношением концентраций веществ на входе 1 : 0,02 : 2 соответственно (см. рисунок 4). В секции I производится предварительная фотодиссоциация молекулярного йода под действием излучения с длиной волны $\lambda_A \approx 500$ нм. Далее, в секции II, производится непосредственная оптическая накачка перехода $^2P_{1/2}\text{-}^2P_{3/2}$ атомарного йода под действием излучения с длиной волны $\lambda_B = 1315$ нм. Увеличение населённости уровня $^2P_{1/2}$ ведёт к росту концентрации $\text{O}_2(a)$ посредством реакции (1). Доля $\text{O}_2(a)$ стремится к предельному значению:

$$Y_T = \frac{1}{2K_{eq}(T) + 1}, \quad (17)$$

где $K_{eq} = 0,75 \exp(400/T)$ – константа равновесия реакции (1).

В присутствии синглетного кислорода протекает цепной процесс диссоциации молекулярного йода. В точке достижения максимальной концентрации $\text{O}_2(a)$ йод полностью диссоциирует. Там же установлена сопловая решётка

ка, посредством которой поток разгоняется до $Mach = 3$. Температура потока падает, а доля $O_2(a^1\Delta)$ кислорода превышает пороговое значение. Вследствие процесса 1 на переходе тонкой структуры атома йода достигается инверсная населённость.

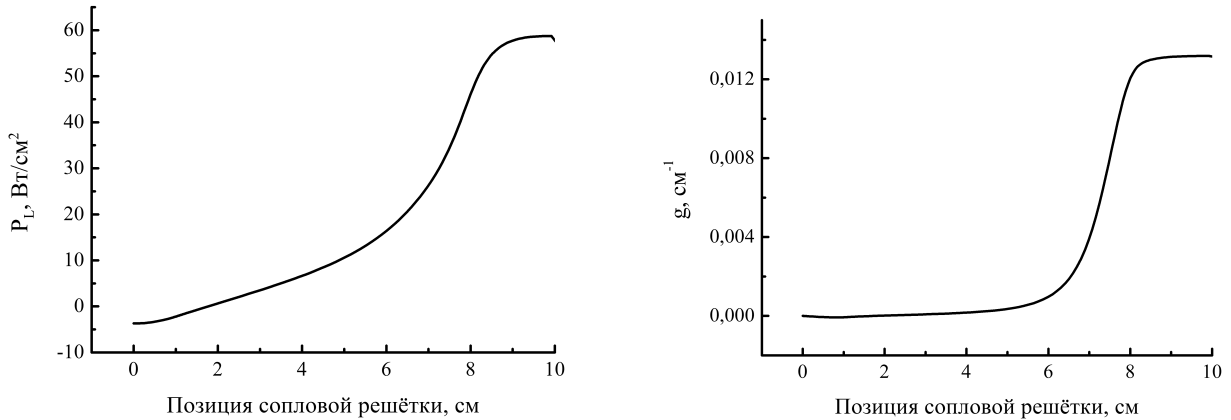


Рисунок 5 — Зависимость удельной мощности и усиления слабого сигнала системы от положения сопловой решётки

Был рассмотрен случай, когда частоты процессов $I_2 + h\nu_A \rightarrow 2I$ и $I + h\nu_B \rightarrow I^*$ имеют величину $\Gamma_A = 200 \text{ с}^{-1}$ и $\Gamma_B = 2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ соответственно, при суммарном давлении среды 37 тор, температуре потока 300 К и начальной скорости потока 110 м/с. Указанные частоты процессов достигаются при интенсивностях $J_A \approx 30 \text{ Вт/см}^2$ для излучения фотодиссоциации и $J_B \approx 5500 \text{ Вт/см}^2$ для излучения накачки.

Были получены аналитические оценки максимальной доли $O_2(a)$ $Y_s \approx 0,13$, при этом степень диссоциации йода стремится к 100%. Путём численного решения системы кинетических уравнений было показано, что можно получить удельную мощность системы $P_L = 60 \text{ Вт/см}^2$ и усиление слабого сигнала $g = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ (рисунок 5) при оптической эффективности $\eta_L = 0,5$.

Одна из основных проблем предлагаемой системы – низкая степень поглощения излучения накачки ввиду малой ширины атомарной линии йода. Для уширения линии поглощения было предложено использование эффекта Зеемана, было показано что в возмoжен рост доли поглощённого излучения с 56% до 63% при приложении магнитного поля с индукцией 450 Гс.

Предложенный метод фотоиндуцированной диссоциации йода и генерации синглетного кислорода был экспериментально апробирован. Камера со смесью O_2-I_2 облучалась с торцов излучением второй гармоники YAG лазера с длиной волны 534 нм и излучением химического кислородно-йодного лазера (ХКИЛ) с длиной волны 1315 нм. Излучение YAG лазера использовалось для фотолиза молекулярного йода. При отключении излучения YAG лазера и облучении содержимого камеры лишь излучением ХКИЛ, в камере наблюдалось стабильное излучение полосы $B \rightarrow X$ молекулы йода и $b \rightarrow X$ молекулы

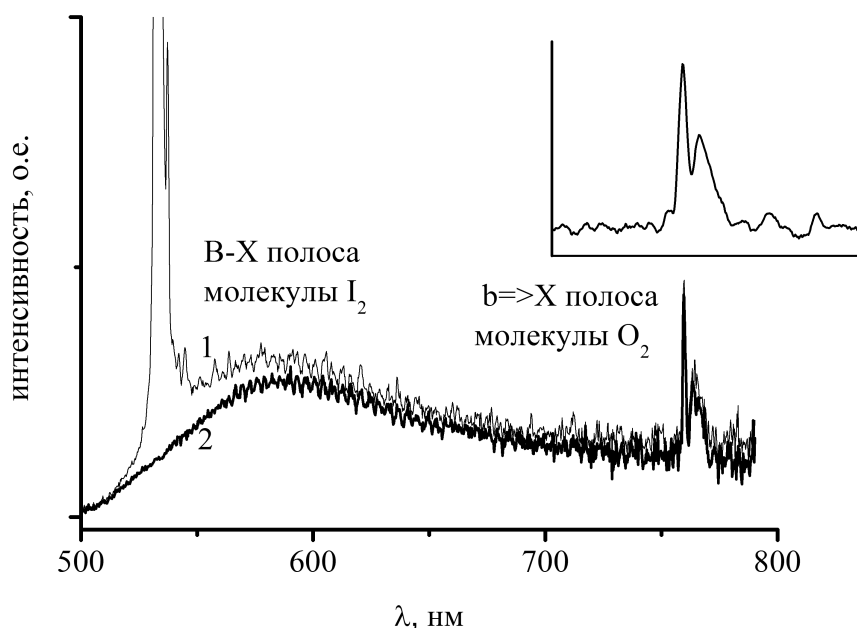


Рисунок 6 — Спектр излучения полосы $B \rightarrow X$ молекулы йода и $b \rightarrow X$ молекулы кислорода при облучении смеси O_2-I_2 излучением на длинах волн 532 нм и 1315 нм (1), только излучением на длине волны 1315 нм (2)

кислорода, что свидетельствует о протекании процессов диссоциации йода и образовании синглетного кислорода.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Создана экспериментальная установка для измерения концентраций электронно-возбуждённых атомов, молекул и исследования кинетики их взаимодействия в кислородно-йодном потоке.
2. При помощи разработанной экспериментальной установки получены значения констант скорости для реакций образования $O_2(b^1\Sigma)$:
 $O_2(a) + O_2(a) \rightarrow O_2(b) + O_2(X) - (4,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{с};$
 $O_2(a) + I^* \rightarrow O_2(b) + I - (2,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}.$
3. Определены константы скорости для дезактивации $O_2(a)$ в реакциях:
 $O_2(a) + O_2(a) \rightarrow \text{продукты} - (10 \pm 2) \cdot 10^{-17} \text{ см}^3/\text{с};$
 $O_2(a) + I^* \rightarrow \text{продукты} - (6 \pm 1,1) \cdot 10^{-13} \text{ см}^3/\text{с}.$
4. Показано, что доминирующим каналом диссоциации йода на иницирующей стадии является реакция $O_2(b) + I_2 \rightarrow O_2(X) + 2I$. Измерена константа скорости данной реакции, имеющая величину $(8,3 \pm 1,1) \cdot 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}.$
5. Показано, что роль трёхчастичных взаимодействий $2O_2(a) + I_2 \rightarrow 2I + 2O_2(X)$ и $O_2(a) + I^* + I_2 \rightarrow 3I + O_2(X)$ а также процессов с участием колебательно-возбуждённого кислорода является незначи-

тельной на иницилирующей и цепной стадиях процесса диссоциации молекулярного йода. Основными каналами диссоциации йода на цепной стадии являются реакции $O_2(b) + I_2 \rightarrow O_2(X) + 2I$ и $I_2(\nu) + O_2(a) \rightarrow 2I + O_2(X)$.

6. Разработан метод получения активной среды кислородно-йодного лазера путём оптической накачки перехода ${}^2P_{1/2} - {}^2P_{3/2}$ атомарного йода с последующим газодинамическим охлаждением потока. Путём аналитических и численных расчётов даны оценки удельной мощности $P_L = 60 \text{ Вт/см}^2$, усиления слабого сигнала $g = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$ и оптической эффективности $\eta_L = 0,5$ системы.
7. Экспериментально показано, что оптическая накачка перехода ${}^2P_{1/2} - {}^2P_{3/2}$ атома йода под действием излучения с длиной волны 1315 нм в кислородно-йодной среде ведёт к образованию $O_2(b^1\Sigma)$, $O_2(a^1\Delta)$ и диссоциации молекулярного йода.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. М.В. Загидуллин, Н.А. Хватов, М.С. Малышев. Кинетика образования молекул $O_2(^1\Sigma)$ в реакциях с участием возбужденных молекул кислорода $O_2(^1\Delta)$ и атомов йода $I(^2P_{1/2})$ // *Химическая физика*. — 2011. — Т. 30, № 12. — С. 3–8.
2. Dissociation of Molecular iodine in flow tube in the presence of $O_2(^1\Sigma)$ molecules / Zagidullin M.V., Khvatov N.A., Malyshev M.S., Svistun M.I. // *J. Phys Chem. A*. — 2012. — Vol. 116. — Pp. 10050–10053.
3. Кинетика процессов дезактивации энергии в среде $O_2(^1\Delta) - I$ / Загидуллин М.В., Хватов Н.А., Свистун М.И., Малышев М.С. // *Химическая физика*. — 2013. — Т. 32, № 6. — С. 3–9.
4. М.В. Загидуллин, М.С. Малышев, В.Н. Аязов. Кинетика кислородно-йодной активной среды с оптической накачкой атомов йода на переходе ${}^2P_{3/2} - {}^2P_{1/2}$ // *Квантовая электроника*. — 2015. — Т. 45, № 8. — С. 720–724.
5. Результаты экспериментов по диссоциации молекулярного йода в присутствии молекул синглетного кислорода / Загидуллин М.В., Хватов Н.А., Малышев М.С., Свистун М.И. // *Квантовая электроника*. — 2016. — Т. 46, № 8. — С. 706–712.

Публикации в трудах конференций:

1. M. Malyshev, M. Zagidullin. Prospect of optically pumped oxygen-iodine lasers // *Proceedings of Laser Optics, 2014 International Conference / IEEE*. — 2014.

2. Optical pumping of the oxygen-iodine laser medium / Zagidullin M.V., Malyshev M.S., Azyazov V.N., Heaven M.C. // Proceedings of SPIE LASE / SPIE. — 2016. — P. 97290G.
3. *M.V. Zagidullin, M.S. Malyshev, N.A. Khvatov*. Experimental study of iodine dissociation in active medium of oxygen-iodine laser // Proceedings of Laser Optics (LO), 2016 International Conference / IEEE. — 2016. — Pp. R2–17.
4. *Malyshev M.S., M.V. Zagidullin*. Impact of water vapor concentration on $O_2(a^1\Delta)$ yield in optically pumped oxygen-iodine laser // Proceedings of Laser Optics (LO), 2016 International Conference / IEEE. — 2016. — Pp. R2–6.
5. *M.V. Zagidullin, M.S. Malyshev*. Optically pumped oxygen-iodine laser // Proceedings of XXI International Symposium on High Power Laser Systems and Applications / SPIE. — 2017. — P. 102540H.
6. *M.V. Zagidullin, N.A. Khvatov, M.S. Malyshev*. Results of experiments on iodine dissociation in active medium of oxygen-iodine laser // Proceedings of XXI International Symposium on High Power Laser Systems and Applications / SPIE. — 2017. — P. 102540I.
7. *М.С. Малышев*. Бесконтактное измерение температуры газа по анализу спектров излучения кислорода в диапазоне 600-800 нм // Труды Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Перспективные информационные технологии для авиации и космоса». — Самара: 2010. — С. 719–721.
8. *М.С. Малышев*. Определение вероятности образования колебательно возбужденных молекул кислорода в реакции $O_2(a^1\Delta) + O_2(a^1\Delta) \rightarrow O_2(b^1\Sigma) + O_2(X^3\Sigma)$ // Сборник трудов Всероссийской молодёжной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук». — М.: МФТИ, 2011. — С. 34–36.
9. *М.С. Малышев*. Определение вероятности образования колебательно-возбужденных молекул в реакции димольного взаимодействия синглетного кислорода // IX Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник конкурсных докладов (Самара, 9–13 ноября 2011 г.). — М.: ФИАН, 2011. — С. 60–66.
10. *М.С. Малышев*. Моделирование кинетики диссоциации молекулярного йода в присутствии синглетного кислорода // X Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике. 7-11 ноября 2012 года. Сборник конкурсных докладов. — М.: ФИАН, 2012. — С. 343–348.
11. *М.С. Малышев*. Кинетика диссоциации молекулярного йода в присутствии синглетного кислорода // XI Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник конкурсных докладов (Самара, 6–10 ноября 2013 г.). — М.: ФИАН, 2013. — С. 30–36.
12. *М.С. Малышев, М.В. Загидуллин*. Кислородно-йодный лазер с оптической накачкой // III Международная молодежная научная школа-конференция,

- 10-13 апреля 2014 г.: Тезисы докладов. — М.: НИЯУ МИФИ, 2014. — С. 286–287.
13. *М.С. Малышев, М.В. Загидуллин.* Кислородно-йодный лазер с оптической накачкой – кинетическая модель // *Динамика и виброакустика машин: сборник докладов второй международной научно-технической конференции 15-17 сентября 2014 г.* — Самара: СГАУ, 2014. — С. 476–479.
 14. *М.С. Малышев, М.В. Загидуллин.* Модель кислородно-йодного лазера с оптической накачкой в изотермическом приближении // *XII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник конкурсных докладов (Самара, 12–15 ноября 2014 г.)*. — М.: ФИАН, 2014. — С. 84–90.
 15. *М.С. Малышев, М.В. Загидуллин.* Применение эффекта Зеемана при оптической накачке в кислородно-йодной среде // *XIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике: сборник конкурсных докладов (Самара, 11–14 ноября 2015 г.)*. — М.: ФИАН, 2014. — С. 105.
 16. *М.В. Загидуллин, М.С. Малышев.* Генерация молекул синглетного кислорода $O_2(a^1\Delta)$ посредством оптической накачки атомов йода // *АВИАДВИГАТЕЛИ XXI ВЕКА. Москва 24-27 ноября 2015 г. Сборник тезисов докладов*. — М.: ЦИАМ, 2015. — С. 1050.
 17. *М.С. Малышев.* Уширение линии поглощения при оптической накачке в кислородно-йодной среде // *Современные проблемы физики и технологий. V-я Международная молодежная научная школа-конференция, 18-23 апреля 2016 г.: Тезисы докладов. Часть 1*. — М.: НИЯУ МИФИ, 2016. — С. 281.

Патенты:

1. Пат. 2548622 Российская федерация H01S 3/22, H01S 3/0953. Способ получения инверсной населенности на атомах йода / Загидуллин М.В., Аяззов В.Н., Малышев М.С.; заявитель и правообладатель СГАУ (RU) — №2013151433/28; заявл. 19.11.13; опубл. 20.04.15, Бюл. №11. — 10 с.