

Генерация синглетного кислорода для кислородно-иодного лазера в высокочастотном разряде

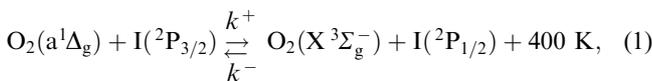
О.В.Брагинский, А.Н.Васильева, К.С.Клоповский, А.С.Ковалев, Д.В.Лопаев, Ю.А.Манкелевич, Н.А.Попов, А.Т.Рахимов, Т.В.Рахимова

Экспериментально и теоретически исследована генерация синглетного кислорода (СК) в высокочастотном разряде (13.56 МГц) в потоке газа. Давление кислорода менялось от 2 до 20 Тор, энергозатрат в газ – от 10 до 2000 Дж/ммоль. Показано, что насыщение концентрации СК при увеличении энергозатрат связано с трехкратным процессом тушения СК атомарным кислородом. Удаление атомарного кислорода позволило в 2.5 раза увеличить предельную концентрацию СК на выходе из разряда. При давлении кислорода 15 Тор доля СК составляет 10 %.

Ключевые слова: синглетный кислород, кислородно-иодный лазер, высокочастотный разряд.

1. Введение

В настоящее время существует заметный интерес к процессам с участием метастабильных электронно-возбужденных молекул синглетного кислорода (СК) $O_2(a^1\Delta_g)$. Это связано с тем, что СК имеет очень большое радиационное время жизни (~ 4500 с) и крайне низкие скорости нерезонансной дезактивации, что позволяет создавать и длительное время сохранять неравновесный энергозапас в среде, содержащей $O_2(a^1\Delta_g)$. Эта особенность СК не только играет важную роль в разных областях науки, например в физике низкотемпературной плазмы, биологии, физике атмосферы и т. д., но и используется в лазерной технике. Наиболее ярким примером такого использования является кислородно-иодный лазер (КИЛ) [1, 2]. Основным процессом, определяющим принцип его действия, является резонансная передача энергии возбуждения от молекул кислорода $O_2(a^1\Delta_g)$ атомам иода $I(^2P_{1/2})$



где $k^+ = 7.6 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ – константа скорости прямого процесса при 300 К [1], $k^- = 2.67 \times 10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$ – константа скорости обратного процесса [1, 2]. Инверсия между уровнями атома иода $I(^2P_{1/2})$ и $I(^2P_{3/2})$ достигается при выходе $O_2(a^1\Delta_g)$

$$\eta = \frac{[O_2(a^1\Delta_g)]}{[O_2(a^1\Delta_g)] + [O_2]} > \frac{1}{1 + 2k_{\text{eq}}}, \quad (2)$$

где

$$k_{\text{eq}} = \frac{3}{4} \exp\left(\frac{400}{T_g}\right) \quad (3)$$

О.В.Брагинский, А.Н.Васильева, К.С.Клоповский, А.С.Ковалев, Д.В.Лопаев, Ю.А.Манкелевич, Н.А.Попов, А.Т.Рахимов, Т.В.Рахимова. НИИ ядерной физики им. Д.В.Скобельцына МГУ им. М.В.Ломоносова, Россия, 119992 Москва, Воробьевы горы; e-mail: kovalev@dnph.phys.msu.ru; trakhimova@mics.msu.ru

Поступила в редакцию 13 сентября 2004 г.

– константа равновесия процесса (1). При температуре $T_g = 300$ К выход СК $\eta = [O_2(a^1\Delta_g)]/([O_2(a^1\Delta_g)] + [O_2])$ должен превышать 0.15. В химическом КИЛ молекулы $O_2(a^1\Delta_g)$ нарабатываются химическим образом в реакторе, как правило в газожидкостной реакции хлорирования раствора щелочи и перекиси водорода. Выходящая из реактора газовая смесь содержит кислород, пары воды, H_2O_2 и не прореагировавший хлор, поэтому создание генератора СК, альтернативного химическому, представляет определенный интерес.

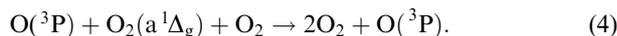
Известно, что СК может эффективно возбуждаться в газовом разряде. Для работы электроразрядного генератора СК (ЭГСК) требуется выполнение двух условий. Поскольку при повышении температуры необходимый для получения инверсии в КИЛ выход СК экспоненциально растет, то в ЭГСК он должен быть достаточно большим (~ 0.2). При этом абсолютная концентрация $O_2(a^1\Delta_g)$ также должна быть высокой (сравнимой и превышающей характерную для действующих химических КИЛ [1]), т. е. более 10^{16} см^{-3} . В работах [2–5] было показано, что достаточно перспективным способом возбуждения СК могут быть высокочастотные и микроволновые разряды.

В работе [4] мы провели экспериментально-теоретическое исследование кинетики образования и гибели СК в потоке чистого кислорода, а также смесей его с аргонном и гелием, возбуждаемых ВЧ разрядом (13.56 МГц) в кварцевой трубке в широком диапазоне давлений (1–20 Тор) и энергозатрат (10–2000 Дж/ммоль). Было показано, что в зависимости от энергозатрат в плазму ВЧ разряд может существовать в трех режимах: в режиме однородного горения между электродами, или α -режиме (в α -моде разряда), в существенно неоднородном режиме, когда за зоной электродов образуются плазменные факелы (jet-мода), и в переходном $\alpha - \gamma$ -режиме, когда в разряде появляются яркие приэлектродные слои. Наиболее активно СК образуется в α -моду разряда, при этом энергетическая эффективность оказывается близкой к 5 %, тогда как в режиме jet-моды эффективность значительно падает (до 1 %–2 %) из-за больших потерь энергии в приэлектродных слоях, в которых возникают эффекты вторичной ионной эмиссии.

Одним из важных результатов проведенных исследо-

ваний является насыщение концентрации СК при увеличении давления и удельного энерговклада. При этом, несмотря на насыщение концентрации СК, параметр $Y = [O_2(a^1\Delta_g)]/[O_2(X^3\Sigma_g^-)]$ достигал $\sim 30\%$ при низких давлениях кислорода (1–2 Тор) и большом энерговкладе, т. е. в jet-моде разряда.

Детальное исследование процессов образования и гибели СК в α -режиме на основе разработанной самосогласованной модели разряда позволило выяснить причины насыщения выхода СК с увеличением давления. Было показано, что за данный эффект ответственно быстрое тушение $O_2(a^1\Delta_g)$ в процессе



На основании сравнения экспериментальных и численных данных по кинетике тушения $O_2(a^1\Delta_g)$ была сделана оценка константы скорости этого процесса ($k_4 \sim 10^{-32} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$).

Прогресс в использовании электроразрядного возбуждения СК в КИЛ связан в первую очередь с возможностью увеличения давления активной среды. В связи с этим цель данной работы – исследование кинетики насыщения СК в ВЧ разряде в кислороде и поиск путей устранения эффекта насыщения концентрации СК. Исследования проводились в переходном α – γ -режиме, когда удельный энерговклад в плазму уже достаточно велик (от 100 до 300 Дж/ммоль), но еще не реализован неэффективный режим jet-моды и довольно высока ($\sim 3\%$) энергетическая эффективность возбуждения $O_2(a^1\Delta_g)$. Область исследуемых давлений составляла 4–20 Тор.

Поскольку насыщение концентрации СК определяется процессом (1), то для устранения насыщения необходимо удалить атомарный кислород из газовой смеси. Как было установлено ранее в экспериментах с ВЧ разрядом, во всем исследуемом диапазоне давлений основным процессом, определяющим гибель атомов, является их гетерогенная рекомбинация на стенках разрядной кварцевой трубки [4]. Известно, что на оксидах некоторых металлов (например, HgO, AgO и т.п.) вероятность поверхностной рекомбинации атомов $O(^3P)$ достаточно высока. Поэтому для удаления атомарного кислорода стенки разрядной трубки покрывались оксидом ртути HgO.

2. Эксперимент

Схема установки для получения ВЧ разряда приведена на рис.1. ВЧ разряд зажигался в потоке чистого кислорода в кварцевой трубке длиной 1 м с внутренним диаметром 14 мм, для чего использовался ВЧ генератор I мощностью до 200 Вт, работающий на частоте 13.56 МГц. Мощность от генератора через устройство согласования подводилась к двум электродам длиной 30 см, расположенным снаружи трубки, которые охлаждались водой. За счет специальной прокладки осуществлялся тепловой контакт электродов и трубки. Таким образом, с помощью электродов охлаждалась также и разрядная трубка. Система ВЧ измерений обеспечивала измерение амплитуды падающей и отраженной волн, а также напряжения на электродах, разрядного тока и угла сдвига фаз между ними, что позволяло с хорошей точностью контролировать вкладываемую в газ ВЧ мощность. Си-

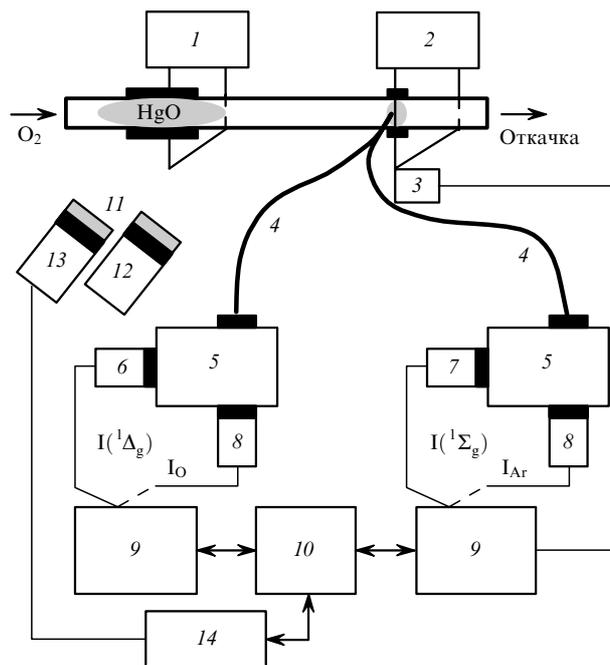


Рис.1. Схема установки для получения поперечного ВЧ разряда: 1 – основной ВЧ генератор; 2 – вспомогательный ВЧ генератор (40 МГц, длина электродов 1 см); 3 – измерительная система, определяющая положение оптоволоконно относительно электродов основного ВЧ разряда; 4 – двухканальное оптоволоконно; 5 – монохроматоры; 6 – Ge-детектор, охлаждаемый жидким азотом; 7 – ФЭУ для регистрации излучения молекул $O_2(b^1\Sigma_g^+)$; 8 – ФЭУ для регистрации излучения атомов кислорода ($O(^5P) \rightarrow O(^5S)$, $\lambda = 777 \text{ нм}$) и аргона ($Ar(2p_1) \rightarrow Ar(1s_2)$, $\lambda = 750 \text{ нм}$); 9 – синхронные детекторы; 10 – компьютер; 11 – интерференционные фильтры; 12 – радиометр абсолютной мощности излучения; 13 – ICCD-камера; 14 – ICCD-контроллер.

стема откачки газа обеспечивала скорость потока газа в трубке до 12 м/с при давлении до 40 Тор. Давление газа контролировалось двумя деформационными датчиками на входе и выходе трубки. Температуры газа и поверхности трубки определялись с помощью термопар, перемещаемых вдоль трубки.

Концентрации молекул кислорода, находящихся в метастабильных состояниях $a^1\Delta_g$ и $b^1\Sigma_g^+$, измерялись вдоль потока газа как функции транспортного времени с помощью метода эмиссионной спектроскопии по абсолютной интенсивности излучения переходов $O_2(a^1\Delta_g, v=0) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v=0)$ ($\lambda = 1268 \text{ нм}$) и $O_2(b^1\Sigma_g^+, v=0) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v=0)$ ($\lambda = 762 \text{ нм}$) соответственно. Излучение из выделенного системой диафрагм сечения трубки фокусировалось на вход двухканального оптоволоконно, что обеспечивало два независимых оптических канала измерения. Данная оптическая система была собрана на платформе 3, перемещаемой вдоль трубки, что позволяло измерять концентрации возбужденных частиц на различном расстоянии от разряда.

Излучение в обоих каналах модулировалось и попадало на входные щели монохроматоров 5. На выходе первого монохроматора, используемого для регистрации излучения молекул $O_2(a^1\Delta_g)$, был установлен Ge-детектор 6, охлаждаемый жидким азотом, а на выходе второго монохроматора – ИК чувствительный фотозумматор 7, одновременно регистрирующий излучение молекул $O_2(b^1\Sigma_g^+)$. Электрические сигналы с обоих приемников излучения поступали на син-

хронные детекторы 9, управляемые персональным компьютером 10. Кроме этого на вход АЦП одного из синхронных детекторов поступал сигнал о положении оптической системы 3 относительно электродов ВЧ разряда. Чувствительность собранной оптической системы позволяла измерять концентрации молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ (до $(2-3) \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ (до 10^{10} см^{-3}).

Для регистрации атомов кислорода в основном состоянии $O(^3P)$ применялся метод актинометрии по атомам аргона. Мы использовали переходы $O(^5P) \rightarrow O(^3S)$ с $\lambda = 777 \text{ нм}$ и $Ar(2p_1) \rightarrow Ar(1s_2)$ с $\lambda = 750 \text{ нм}$, сечения электронного возбуждения и скорости столкновительной дезактивации которых достаточно хорошо известны, что позволяет получать надежные результаты по концентрации атомарного кислорода при высоких давлениях. Подробно данный метод с использованием двух каналов (монохроматор-ФЭУ) описан в [4]. В исследовании динамики концентрации $O(^3P)$ мы также использовали ICCD-систему 13, 14 с набором интерференционных фильтров 11 на линии излучения атомов кислорода и аргона. Это дало возможность с помощью алгоритма томографии, подобного преобразованию Абеля, получить пространственное распределение атомов в объеме разряда. На основании этой информации были получены данные о распределении концентрации атомарного кислорода в разряде вдоль потока газа.

3. Результаты эксперимента

Эксперименты показали, что концентрация $O_2(a^1\Delta_g)$ достигает насыщения в межэлектродном пространстве, причем характерное время выхода на насыщение уменьшается с ростом энерговыклада. На рис.2 представлено распределение вдоль разряда отношения $[O(^3P)]/N$ (N – полная плотность частиц в объеме разряда при соответствующей температуре газа), а на рис.3 – распределения $[O_2(a^1\Delta_g)]$ в чистом O_2 при давлении 15 Тор, скорости потока 6.3 м/с и энерговыкладе 190 Дж/ммоль. Видно, что уже в самом начале разряда отношение $[O(^3P)]/N$ достигает своего стационарного значения, которое несколько увеличивается к концу разряда. Концентрация же молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ достигает максимума ближе к концу электродов, примерно на длине 15–20 см.

Зависимости концентраций $O_2(a^1\Delta_g)_{\text{max}}$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)_{\text{max}}$

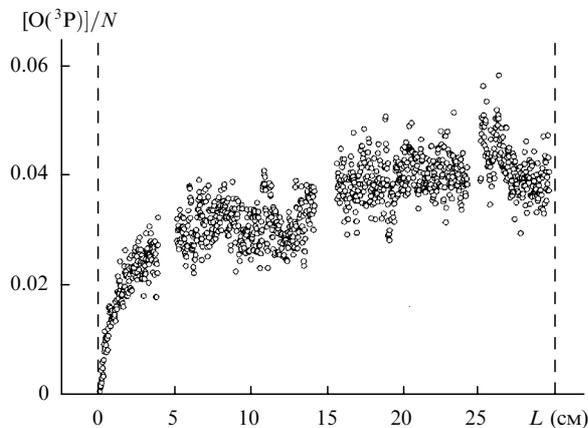


Рис.2. Распределение отношения $[O(^3P)]/N$ вдоль разряда (N – полная плотность частиц в объеме разряда при соответствующей температуре газа) в чистом O_2 при давлении 15 Тор, скорости потока 6.3 м/с и энерговыкладе 190 Дж/ммоль без покрытия стенок трубки HgO.

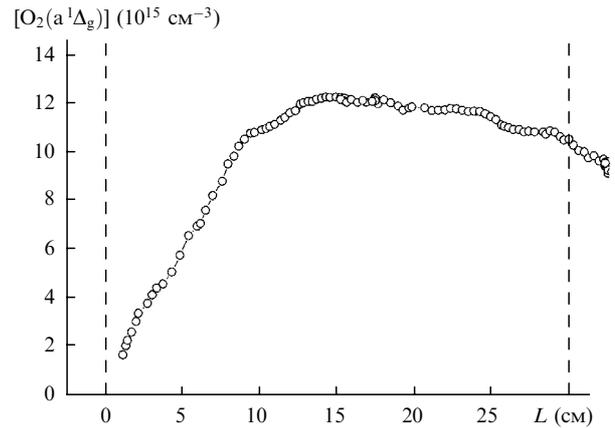


Рис.3. Распределение $[O_2(a^1\Delta_g)]$ в чистом O_2 при давлении 15 Тор, скорости потока 6.3 м/с и энерговыкладе 190 Дж/ммоль без покрытия стенок трубки HgO.

от удельного энерговыклада в разряд в чистом O_2 при давлении 4, 7, 10 и 15 Тор и скорости прокачки 6.3 м/с представлены на рис.4. Видно, что эти зависимости имеют немонотонный характер. При всех давлениях с ростом энерговыклада концентрации $O_2(a^1\Delta_g)_{\text{max}}$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)_{\text{max}}$ довольно быстро достигают насыщения, а затем постепенное уменьшаются. Ранее [4] при исследовании кинетики концентрации СК в послесвечении ВЧ разряда было установлено, что с увеличением давления в послеразрядной стадии наблюдается быстрое тушение $O_2(a^1\Delta_g)$, которое невозможно описать известными в настоящее время бинарными процессами. На основе детального анализа и сравнительных расчетов, проведенных для различных давлений, было установлено, что полученные экспериментальные данные по транспортной динамике СК можно объяснить только с привлечением трехтельного механизма дезактивации $O_2(a^1\Delta_g)$ атомами кислорода в процессе (4) с константой скорости $\sim 10^{-32} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$.

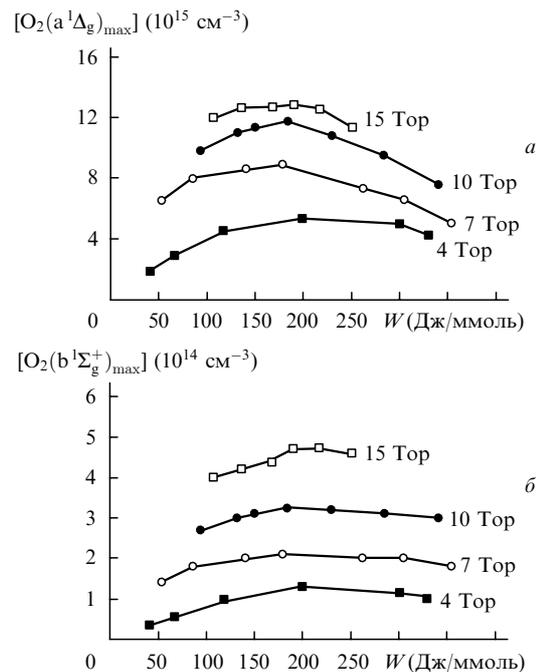


Рис.4. Зависимости максимальной концентрации $O_2(a^1\Delta_g)_{\text{max}}$ (а) и $O_2(b^1\Sigma_g^+)_{\text{max}}$ (б) от удельного энерговыклада в разряд в чистом O_2 при разных давлениях и скорости прокачки 6.3 м/с.

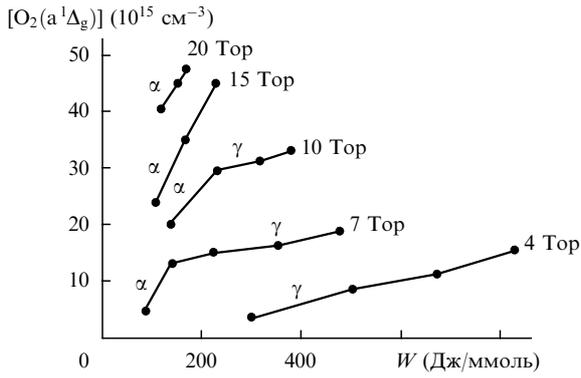
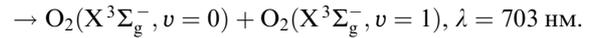
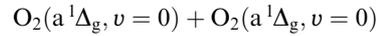
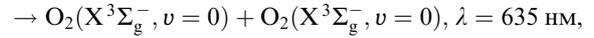
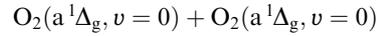


Рис.5. Зависимости максимальной концентрации O₂(a¹Δ_g)_{max} от удельного энерговклада в разряд (α- и α-γ-режимы) в чистом O₂ при разных давлениях и скорости прокачки 6.3 м/с. Стенки трубки покрыты HgO.

С целью удаления атомарного кислорода стенки разрядной трубки в области электродов были покрыты оксидом ртути HgO. На рис.5 представлены зависимости концентрации O₂(a¹Δ_g)_{max} от энерговклада в разряд, аналогичные представленным на рис.4. Измерения концентрации СК в экспериментах с HgO проводились в послесвечении разряда. Как показали эксперименты, при скорости потока ~6 м/с концентрация O₂(a¹Δ_g)_{max} почти не изменяется на расстояниях до 20 см от конца электродов. Видно, что для различных давлений удаление атомарного кислорода в разной степени отразилось на характерном виде зависимостей O₂(a¹Δ_g)_{max}(W). Наиболее важным результатом является то, что в области существования α- и переходного α-γ-режимов насыщения концентрации O₂(a¹Δ_g) с увеличением вкладываемой в плазму мощности не происходит. При этом значение Y при давлении p = 10 – 15 Тор составляет 10 % – 12 % и ограничивается лишь мощностью ВЧ генератора.

Получение высокой концентрации СК при использо-

вании HgO дало возможность регистрировать динамику O₂(a¹Δ_g) также по димольному излучению перехода O₄(¹B_{2u}) → O₄(¹A_g), возникающему в результате столкновения двух молекул O₂(a¹Δ_g):



На рис.6 представлен характерный спектр в области 600–800 нм послесвечения ВЧ разряда в чистом кислороде при давлении 15 Тор, скорости потока 3 м/с и энерговкладе 450 Дж/ммоль на расстоянии 20 см от конца электрода. На вставке для сравнения показан тот же спектр одновременно с хорошо известным переходом O₂(b¹Σ_g⁺, v=0) → O₂(X³Σ_g⁻, v=0) на λ = 762 нм. Данный спектр полностью аналогичен наблюдаемому в химических генераторах СК. Интенсивность димольного излучения СК была достаточно высокой для того, чтобы в темноте визуально наблюдать красное свечение в послесвечении разряда. Более того, мощность димольного излучения также оказалась достаточно большой, и ее можно было измерять непосредственно с помощью радиометра абсолютной мощности. Это позволило проверить точность абсолютных измерений концентрации O₂(a¹Δ_g).

На рис.7 показаны зависимости максимальной концентрации O₂(a¹Δ_g)_{max} от энерговклада при давлении кислорода 5 Тор и скорости потока 3 м/с, полученные из измерений интенсивности излучения перехода O₂(a¹Δ_g, v=0) → O₂(X³Σ_g⁻, v=0) на λ = 1270 нм (после абсолютной калибровки) и прямого измерения мощности ди-

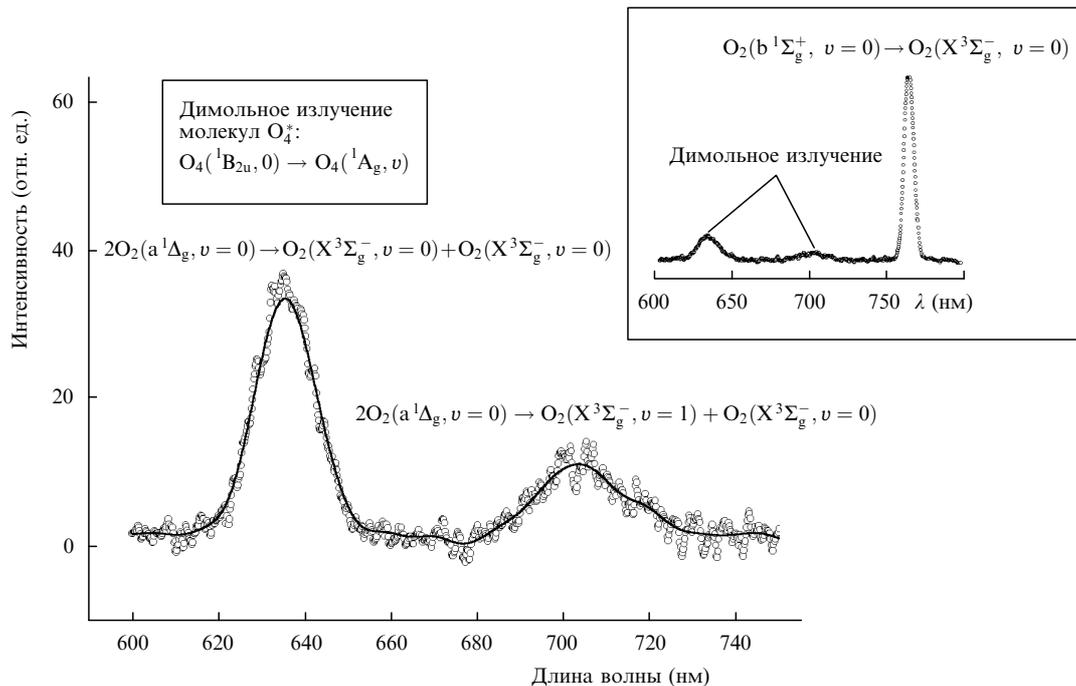


Рис.6. Характерный спектр в области 600–800 нм послесвечения ВЧ разряда в чистом кислороде при давлении 15 Тор, скорости потока 3 м/с и энерговкладе 450 Дж/ммоль на расстоянии 20 см от конца электрода.

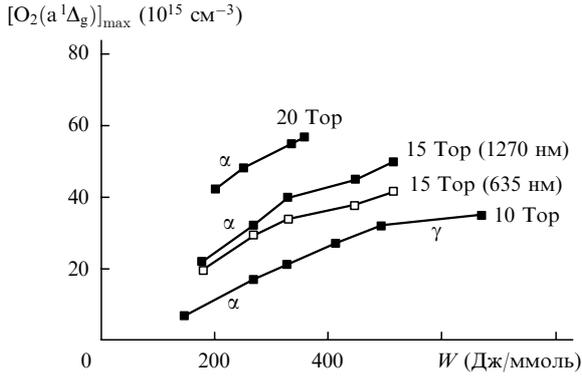


Рис.7. Зависимости максимальной концентрации $O_2(a^1\Delta_g)_{\max}$ от энерговклада при давлении СК 15 Тор и скорости потока 3 м/с, полученные из измерений интенсивности излучения перехода $O_2(a^1\Delta_g, v=0) \rightarrow O_2(X^3\Sigma_g^-, v=0)$ на $\lambda = 1270$ нм и прямого измерения мощности димольного излучения на $\lambda = 635$ нм. Стенки трубки покрыты HgO.

мольного излучения на $\lambda = 635$ нм. С учетом точности калибровки ($\pm 25\%$ (1270 нм) и $\pm 15\%$ (635 нм)) оба измерения дают одинаковый результат, что свидетельствует о корректности полученных данных.

4. Обсуждение результатов

Из сопоставления экспериментальных данных, представленных на рис.4,а и 5, можно сделать следующие выводы. Из рис.5 видно, что зависимости концентрации СК от энерговклада W в экспериментах с HgO не выходят на насыщение, как это было в отсутствие оксида ртути. Однако, начиная с некоторого значения W , определенно для каждого давления, их наклон меняется. Это свидетельствует о возможном изменении структуры ВЧ разряда. А именно, разряд постепенно переходит в $\alpha - \gamma$ режим горения, гораздо менее эффективный с точки зрения возбуждения СК, чем α -режим [4].

Сравнение максимальных концентраций $O_2(a^1\Delta_g)_{\max}$, получаемых в разряде в отсутствие оксида ртути (рис.4, а), с данными, полученными при использовании HgO (рис.5), показывает, что при $p > 10$ Тор в экспериментах с HgO концентрация $O_2(a^1\Delta_g)$ увеличивается примерно в 2–2.5 раза при $W = 100 - 200$ Дж/ммоль. Это свидетельствует о том, что природа насыщения концентрации $O_2(a^1\Delta_g)$ в разряде связана с тушением этой молекулы атомарным кислородом (см. реакцию (4)).

Для анализа и моделирования экспериментальных данных была использована самосогласованная модель α -моды ВЧ разряда [4]. Результаты расчета распределений концентраций $O_2(a^1\Delta_g)$, $O(^3P)$ и отношения $[O(^3P)]/N$ в разряде без HgO при давлении кислорода 15 Тор, энерговкладе 190 Дж/ммоль и скорости прокачки 6.3 м/с представлены на рис.8,а. Аналогичный расчет при наличии оксида ртути на стенках трубки показан на рис.8,б. Для моделирования динамики отношения $[O(^3P)]/N$ в разряде мы использовали выражение для вероятности γ_0 гибели атомов на горячей поверхности кварца, представляющее собой аппроксимацию наших экспериментальных данных, полученных в тлеющем разряде постоянного тока в трубке [6]: $\gamma_0 = 1.5 \times 10^{-3}(0.5 + 1.7 \times A[O(^3P)]/4 \times 10^{15})$, где $A = 1$ при $p \leq 5$ Тор и $A = 5/p$ при $p > 5$ Тор. В случае охлаждаемой поверхности, т. е. при $T_w \approx 280$ К, мы использовали коэффициент перед

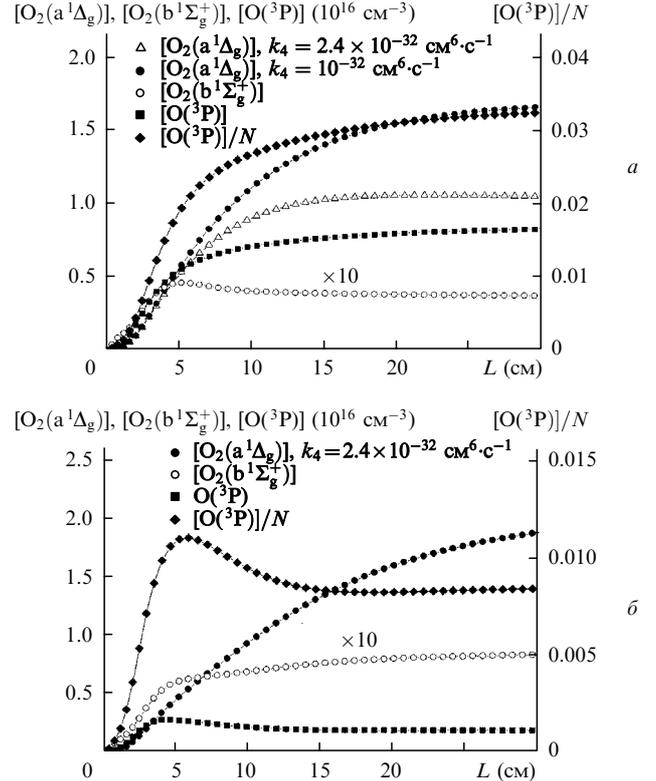
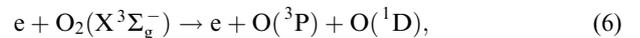
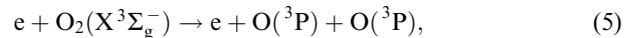


Рис.8. Рассчитанные распределения вдоль разряда концентраций $O_2(a^1\Delta_g)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+)$, $O(^3P)$ и отношения $[O(^3P)]/N$ при давлении кислорода 15 Тор, энерговкладе 190 Дж/ммоль и скорости потока 6.3 м/с в отсутствие покрытия из HgO (а) и при его наличии (б).

скобками, равный 0.5×10^{-3} . Это значение хорошо согласуется как с данными нашего эксперимента в постоянном разряде при давлении выше 3 Тор и охлаждаемой стенке [6], так и с данными [7, 8].

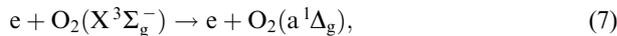
Из сравнения рис.4,а и 8,а видно, что экспериментальные результаты хорошо описываются расчетными значениями отношения $[O(^3P)]/N$. Как показали расчеты, основным процессом образования атомарного кислорода является диссоциация молекул O_2 электронным ударом в процессах



где $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ – молекулы O_2 в основном электронном состоянии. Основным каналом гибели атомов кислорода является их гетерогенная рекомбинация на поверхности кварцевой трубки с характерным временем $\tau_w \sim 10$ мс, определяемым характерными частотами диффузии и рекомбинации атомов на поверхности. Конверсия атомарного кислорода в озон вносит лишь небольшой вклад в гибель атомов. Следует отметить, что в 1D-модели с постоянной по сечению трубки пролетной скоростью v_f сложно учесть реальное радиальное распределение скорости газового потока $v(r) = 2v_0(1 - r^2/R^2)$, где v_0 – средняя скорость потока, R – радиус трубки. Учитывая, что характерное время радиальной диффузии частиц меньше скорости пролета частиц через разрядную область, выход $[O(^3P)]/N$ и $[O_2(a^1\Delta_g)]$ на стационарное распределение, а также экспериментальные энерговклады при заданном ВЧ напряжении на электроде более

адекватно описываются с использованием скоростей пристеночных потоков, а не средней скорости v_0 . Мы использовали в приведенных расчетах $v_f = 0.4v_0$. Расчетный удельный энерговклад при этом составил примерно 190 Дж/ммоль.

Сравним теперь экспериментальные и расчетные данные по распределению концентрации $O_2(a^1\Delta_g)$ вдоль разряда. Из рис.8,а видно, что несмотря на хорошее совпадение результатов расчета и эксперимента по определению отношения $[O(^3P)]/N$, рост концентрации $O_2(a^1\Delta_g)$ в расчете происходит несколько медленнее, чем в эксперименте, и концентрация СК к концу разряда оказывается выше. Как показали расчеты, основным процессом образования $O_2(a^1\Delta_g)$ является возбуждение кислорода прямым электронным ударом,



а выход на насыщение определяется в основном процессом трехтельной дезактивации (4). Скорости тушения молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ в двухчастичной реакции с атомарным кислородом в результате сверхупругих соударений примерно в два раза ниже.

Отметим, что в данном расчете использовалась константа скорости реакции (4) $k_4 = 10^{-32} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$, предложенная в [4]. Однако, как было отмечено в [4], процесс (4) является многостадийным, и вполне возможно, что эта константа, как «брутто» процесса, не при всех условиях одинаково достоверно описывает все его стадии и имеет нетривиальную зависимость от температуры газа. В качестве иллюстрации на рис.8,а приведено распределение $[O_2(a^1\Delta_g)]$, рассчитанное для $k_4 = 2 \times 10^{-32} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$. Видно, что двукратное увеличение k_4 позволяет достаточно хорошо воспроизвести как вид распределения концентрации $O_2(a^1\Delta_g)$, так и его максимальное значение, соответствующее также экспериментальным данным, полученным для димольного излучения $O_2(a^1\Delta_g)$.

Расчеты для условий рис.8,а, но с HgO-покрытием стенок трубки (в модели предполагалось, что этому соответствует $\gamma_0 = 1$) приведены на рис.8,б. Они выполнены при $k_4 = 2.4 \times 10^{-32} \text{ см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$. Видно, что при удалении атомарного кислорода концентрация $O_2(a^1\Delta_g)$ возрастает вдвое по сравнению с концентрацией СК без HgO. Интересно отметить, что в расчетном распределении $[O_2(a^1\Delta_g)]$ в разряде наблюдается слабое насыщение, которое обусловлено ударами второго рода. Рост концент-

рации $O_2(a^1\Delta_g)$ после разряда в начале послесвечения отражает рост плотности газа за счет динамики газовой температуры. Следует отметить, что в эксперименте при использовании HgO в тех же условиях плотность СК выросла примерно втрое. Различие между экспериментальными и расчетными значениями $O_2(a^1\Delta_g)_{\text{max}}$ с HgO в 1.5 раза показывает, что в условиях реального эксперимента реализуются в среднем более высокие температуры электронов ($T_e > 2.2 \text{ эВ}$).

Таким образом, результаты данной работы демонстрируют возможность получения высокого выхода СК в ВЧ разрядах высокого давления. Так, при давлении кислорода 15 Тор выход СК составляет $\sim 10\%$.

5. Заключение

В настоящей работе проведено экспериментально-теоретическое исследование возбуждения СК в $O_2(a^1\Delta_g)$ в α - и промежуточном $\alpha - \gamma$ -режиме ВЧ разряда на частоте 13.56 МГц

Проведены эксперименты по гетерогенному удалению атомов с поверхности разрядной трубки, покрытой оксидом ртути HgO. Показано, что уменьшение концентрации атомарного кислорода в разряде приводит к увеличению плотности молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ примерно в 2–2.5 раза при давлении кислорода свыше 10 Тор. Получены высокие значения выхода СК ($\sim 10\%$) для разряда при давлении 15 Тор.

Работа выполнена при поддержке грантов МНТЦ (№ 1581), Президента России (№ НШ-1713.2003.2) и РФФИ (№ 03-02-16925).

1. Юрьшев Н.Н. *Квантовая электроника*, **23**, 583 (1996).
2. Fujii H., Itam S., Kihara Y., et. al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4065**, 818 (2000).
3. Carroll D.L., King D.M., Verdeyen J.T., Woodard B., Zimmerman J., Skorski L., Solomon W.C. *AIAA Paper*, **4029** (2003).
4. Rakhimova T.V., Kovalev A.S., Rakhimov A.T., Kloповский K.S., Lopaev D.V., Mankelevich Yu.A., Proshina O.V., Braginsky O.V., Vasilieva A.N. *AIAA Paper*, **4306** (2003).
5. Savin Yu.V., Goryachev L.V., Adamenkov A.A., Adamenkov Yu.A., Ilyin S.P., Kolobyanin Yu.V., Kudryashov E.A., Vyskubenko B.A., Rakhimova T.V., Mankelevich Yu.A., Popov N.A. *AIAA Paper*, **4305** (2003).
6. Lopaev D.V., Smirnov A.V. *Proc. ISTAPC-2002*, **1**, 213 (2002).
7. Kim Y.C., Boudart M. *Langmuir*, **7**, 2999 (1991).
8. Cartry G., Magne L., Cernogira G. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **32**, 1894 (1999).