

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА АТОМНОЙ ФИЗИКИ, ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ И
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

КУРСОВАЯ РАБОТА

«ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИКИ ОЗОНА МЕТОДОМ УФ-ПОГЛОЩЕНИЯ В
МОДУЛИРОВАННОМ РАЗРЯДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

«MEASUREMENT OF OZONE DYNAMICS BY UV ABSORPTION IN A MODULATED DC
DISCHARGE»

Выполнила студентка
213 группы
Будаева Дарья Вячеславовна

к.ф.-м. н.:
Богданова Мария Андреевна

Допущена к защите
Зав. кафедрой _____

МОСКВА
2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
АКТУАЛЬНОСТЬ.....	2
ЦЕЛЬ.....	3
ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	7
АНАЛИЗ СТАТЕЙ.....	8
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	9
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	10
	11

ВВЕДЕНИЕ

Плазма представляет собой ионизированный газ, четвертое агрегатное состояние вещества. В плазме атомы или молекулы вещества потеряли или приобрели электроны, образуя нейтральные ионы и свободные электроны. Такое состояние возникает при достаточно высоких температурах или под действием сильных электромагнитных полей. В физическом эксперименте, технике, технологиях и даже в природе плазма чаще всего образуется в так называемом газовом разряде—процессе при протекании тока через газы. На протяжении многих лет электрические разряды в газообразном кислороде, как при низком, так и при атмосферном давлении были предметом экспериментальных и теоретических исследований. Многочисленные газофазные и поверхностные реакции участвуют в образовании и потере важных активных веществ, включая атомы кислорода и молекулы озона.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Озон—аллотропная модификация кислорода O_2 . Благодаря своей повышенной реакционной способности активно используется как окисляющий реагент и дезинфицирующее средство. В различных областях озон применим для очистки поверхностей, стерилизации медицинских изделий, плазменной обработки воды, химического осаждения металлов из паровой фазы оксидные пленки, травления различных материалов и нанесение резистивных полос в микроэлектронике. Газовый разряд является одним из наиболее эффективных и безопасных источников O_3 . Озон образуется в результате реакции диссоциации молекулы O_2 под действием электрона с последующей трехтельной рекомбинацией атомарного и молекулярного кислорода:



где M - третье тело. В экспериментах третьим телом может выступать в том числе стенка камеры газоразрядной трубки. При этом молекулы O_3 часто образуются в различных колебательно-возбужденных состояниях, которые существенно зависят от параметров газовой среды, таких как давление, температура, ток и т.д. Образование на поверхности, а также колебательные состояния вносят вклад в общий процесс накопления озона. Поэтому важно иметь возможность детектировать и контролировать колебательное возбуждение озона. Изучение данного вопроса позволит в дальнейшем совершенствовать технологии озонирования, которая, к примеру, в электронике помогают обеспечить высокое качество и надежность производства полупроводников и других электронных компонентов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В данной работе представляется изучить процессы образования колебательно-возбужденного озона в модулированном разряде постоянного тока, влияние поверхности, а также методы детектирования O_3 . Колебательное возбуждение озона может быть отражено в его УФ-спектре поглощения. Задача – провести анализ изменения спектра во времени с разрешением около миллисекунды в условиях с модуляцией разряд, а именно его форму и амплитуду. При возбуждении озона изменяется форма спектра. Результаты моделирования спектра будут использоваться для регистрации динамики колебательного возбуждения озона.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Спектроскопия

Спектроскопия—физический метод исследования закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с химическим веществом. Такие взаимодействия могут сопровождаться поглощением, излучением или рассеянием электромагнитного излучения. Поглощение света – это явление уменьшения интенсивности света при прохождении его через вещество. Уменьшение интенсивности света происходит в результате того, что энергия света переходит в другие виды энергии: энергию активации, ионизации молекул, энергию теплового хаотического движения частиц в веществе и др. Взаимодействие электромагнитного колебания с веществом приводит к возбуждению переходов между энергетическими уровнями вещества (атома или молекулы). Обратная задача спектроскопии — определение характеристик вещества (не являющихся непосредственно наблюдаемыми величинами) по свойствам его спектров (которые наблюдаются непосредственно и напрямую зависят как от определяемых характеристик, так и от внешних факторов).

Состояния озона

Озон является трехатомной молекулой. Для аналогии рассмотрим более простую двухатомную молекулу. Для основного электронного состояния устойчивой молекулы кривая потенциальной энергии (потенциальная поверхность) выглядит так:

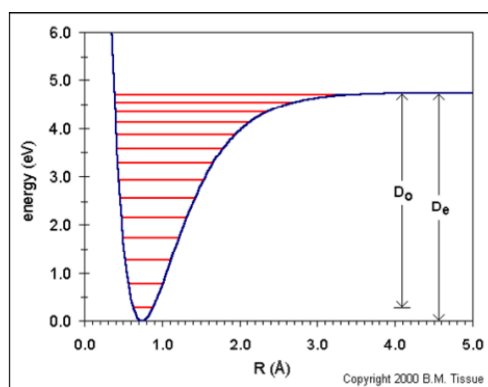


Рис. 1. Кривая (поверхность) потенциальной энергии молекулы A2 для основного электронного уровня. Красные отрезки – уровни колебательной энергии. Разность между D_e и D_0 – это энергия нулевого колебательного уровня молекулы. Наиболее вероятное межатомное расстояние – середина нулевого колебательного уровня

Возбуждение молекулы - квантовый переход атома или молекулы с более низкого, например основного, уровня энергии на более высокий при поглощении ими фотонов или при столкновениях с электронами и другими частицами (возбуждение ударом). Молекула, находящаяся на основном электронном уровне захватывает фотон, т.е. адсорбирует энергию $h\nu$, и вертикально, сохраняя межъядерное расстояние переходит в электронно - возбужденное состояние, попадает на верхнюю кривую. Судьба возбужденной частицы зависит от расположения и формы верхней потенциальной кривой. Молекула в электронно-возбужденном состоянии имеет иную геометрию, по сравнению с основным электронным состоянием. На рис. 2 захват фотона не приводит к диссоциации молекулы A2 и можно наблюдать спектр поглощения (УФ - видимый спектр) A2. Переход с нулевого колебательного уровня нижней кривой на, допустим, первый колебательный уровень верхней кривой называется электронно-колебательным. При колебательной релаксации—многоступенчатом процессе установления равновесия— энергия удаляется в виде тепла или перераспределяется по другим колебательным модам. Процесс релаксации колебательной энергии в озоне является нелинейным (неэкспоненциальным) и зависит от уровня возбуждения.

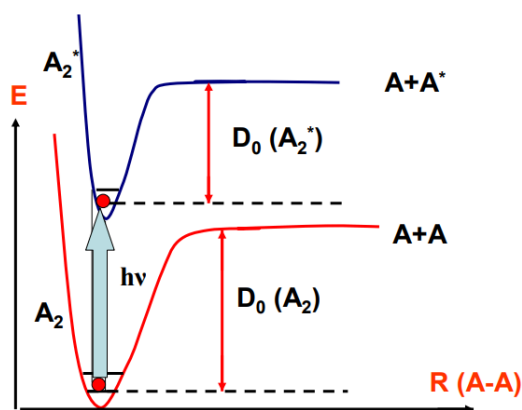


Рис. 2. Переход молекулы A_2 из основного электронного состояния в электронно возбужденное состояние под действием кванта света $h\nu$

Колебательная температура

В разряде часто осуществляются условия, при которых имеет место больцмановский закон заселения молекул по колебательным уровням, но с температурой гораздо выше чем температуры тяжелых частиц и вращательных температур. Такая температура называется колебательной. Колебательная температура не имеет ясного физического смысла; она может быть разной для разных электронных состояний. Иногда колебательные уровни вообще не заселены по закону Больцмана, и понятие колебательной температуры теряет смысл. Высокое ее значение показывает, что в системе существует сверх равновесный запас колебательной энергии, который может проявиться в повышенной реакционной способности.

Спектры озона

По аналогии с двухатомной молекулой энергетические колебательные уровни молекулы озона описываются тремя колебательными числами(модами)— (ijk) , каждое из которых может равняться целому числу: 0,1,2,3... Молекула озона обладает тремя режимами колебаний:

- симметричным растяжением i (1135 см^{-1}),
- изгибом или деформационным j (716 см^{-1})
- асимметричное растяжение k (1089 см^{-1}).

Известно, что спектр поглощения озона УФ-излучением зависит от колебательного состояния (ijk) O_3 . В тех случаях, когда существует некоторое распределение молекул озона по колебательным состояниям, общий спектр поглощения, очевидно, будет зависеть как от

спектров поглощения всех колебательных состояний: $\sigma_{total} = \sum_{ijk} N_{ijk} \sigma_{ijk}$, где σ_{ijk} – спектр поглощения O_3 в состоянии (ijk), а N_{ijk} – населенность состояния (ijk), так и от населенностей этих состояний. Поэтому, зная спектры поглощения для большинства колебательных состояний озона, в принципе можно получить населенность колебательных уровней из спектра, измеренного в эксперименте, по крайней мере, населенность уровней, дающих основной вклад в поглощение. В случае низких колебательных температур можно рассматривать только низшие колебательные состояния O_3 . Как показано ниже, распределение озона по низшим колебательным состояниям оказывается близким к равновесному распределению, что позволяет достаточно корректно оценить колебательную температуру озона по измеренному спектру поглощения озона.

АНАЛИЗ СТАТЕЙ

Кинетика

Работа [1] посвящена изучению процессов образования и потери озона в плазме тлеющего разряда чистого O_2 при повышенном давлении 10–50 Торр. Профили O_3 вдоль диаметра трубки измеряли методом УФ-поглощения. Для получения спектров поглощения *ab initio* (вычисления без экспериментальных данных) были проведены квантово-механические расчеты для 35 низших колебательных состояний молекулы O_3 . Это позволило оценить населенность каждого состояния. Спектр поглощения $1A1 \rightarrow 1B2$ в молекуле O_3 можно представить в виде изображения Фурье автокорреляционной функции (АКФ):

$$\sigma(\omega) = \omega \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i(\omega - E_0/\hbar)t} dt$$

$$f(t) = \int_V \psi^*(t = 0, \vec{r}) d\vec{r}$$

где E_0 – энергия поглощенного фотона, (t, \vec{r}) – волновая функция ядерной подсистемы O_3 в верхнем электронном состоянии $1B2$ в момент времени t после поглощения фотона (в момент $t = 0$). АКФ позволяла оценить зависимость момента перехода $1A1 \rightarrow 1B2$ от координат в межмолекулярной области.

Использовался следующий подход

1. Для расчета спектра поглощения колебательного состояния (ijk) основного состояния $1A1$ молекулы O_3 , требовалось решить трехмерное нестационарное уравнение Шрёдингера с начальными условиями, соответствующими данному колебательному состоянию. Для этого использовался метод псевдокогерентных состояний. Он основан на аппроксимации колебательных волновых функций с использованием суперпозиции гауссовских волновых пакетов.
2. Аппроксимация позволила описать динамику ядерной волновой функции в верхнем электронном состоянии $1B2$ после поглощения фотона в основном колебательном состоянии $O_3(0\ 0\ 0)$.
3. Расчет спектра поглощения каждого колебательного состояния путем аппроксимации колебательных волновых функций гауссовскими волновыми пакетами позволил определить спектральные характеристики молекулы O_3 .
4. Абсолютные сечения поглощения O_3 были рассчитаны *ab initio* для 35 низших колебательных состояний молекулы, что позволило оценить концентрацию колебательных состояний.

В качестве иллюстрации спектры поглощения выбранных колебательных состояний представлены на рис. 3. Затем суммарный рассчитанный спектр поглощения был наилучшим образом подогнан к экспериментальному путем варьирования населенности низко колебательных состояний O_3 , что позволило оценить колебательную температуру озона, поскольку она является единственным свободным параметром распределений. Полученные данные о пространственных распределениях O_3 были проанализированы в рамках простой кинетической 1D-модели. В данной модели учитываются различные процессы, такие как обмен между колебательными состояниями (V-V'-обмен), релаксация по колебательной температуре (V-T-релаксация), реакции с атомарным и синглетным кислородом, а также диссоциация возбужденных молекул O_3 в результате столкновения. Также учитывается процесс поверхностной рекомбинации атомов кислорода и молекул кислорода с вероятностью γ_{O_3} , которая является параметром модели. Модель включает вероятности V-T релаксации на стенке для различных колебательных состояний O_3 . Кроме того, учитываются реакции, такие как трехтельная рекомбинация, с атомарным и синглетным кислородом. Населенность колебательных состояний O_3 могут быть найдены путем сравнения измеренных и рассчитанных спектров. Эксперименты в данной работе проводились в условиях повышенного давления, когда происходит интенсивный колебательный обмен и быстрая релаксация. Поэтому вполне разумно было ожидать, что распределение по

колебательным состояниям озона будет близко к равновесному. Равновесное распределение по колебательным состояниям O_3 было использовано для расчета спектра поглощения озона.

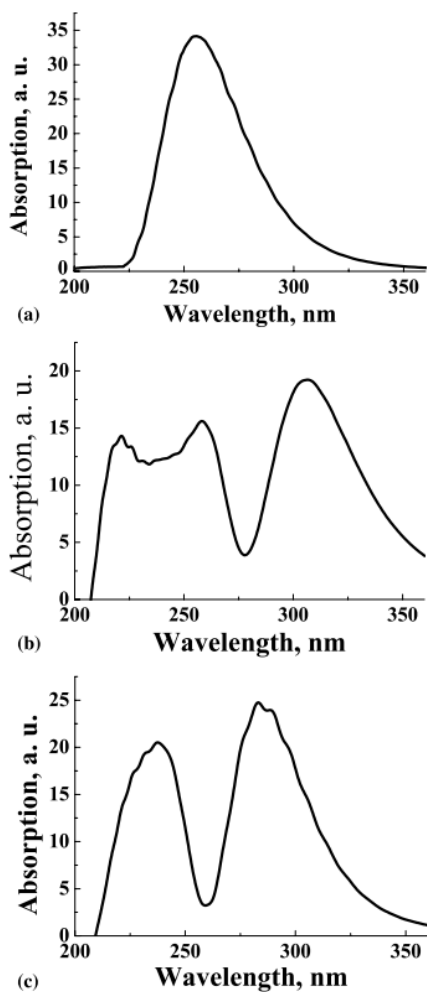


Рис. 3 Спектры поглощения отдельных колебательных состояний молекулы озона ($O_3(ijk)$): (a) $O_3(000)$, (b) $O_3(211)$, (c) $O_3(100)$.

Вклад поверхности

В [1] разряд генерировался в тонкой кварцевой трубке в диапазоне давлений 5–50 торр и плотности тока 35–140 мА см⁻². Оба разряда трубку и электроды охлаждались водой. Для измерения поглощения УФ-излучения на торцах электродов были установлены два окна MgF₂. В качестве источника УФ-излучения использовалась дейтериевая лампа, имеющая стабильный широкополосный спектр в диапазоне 180–340 нм. Излучение лампы проходило через разрядную трубку и УФ-монохроматор, а затем регистрировалось камерой ICCD.

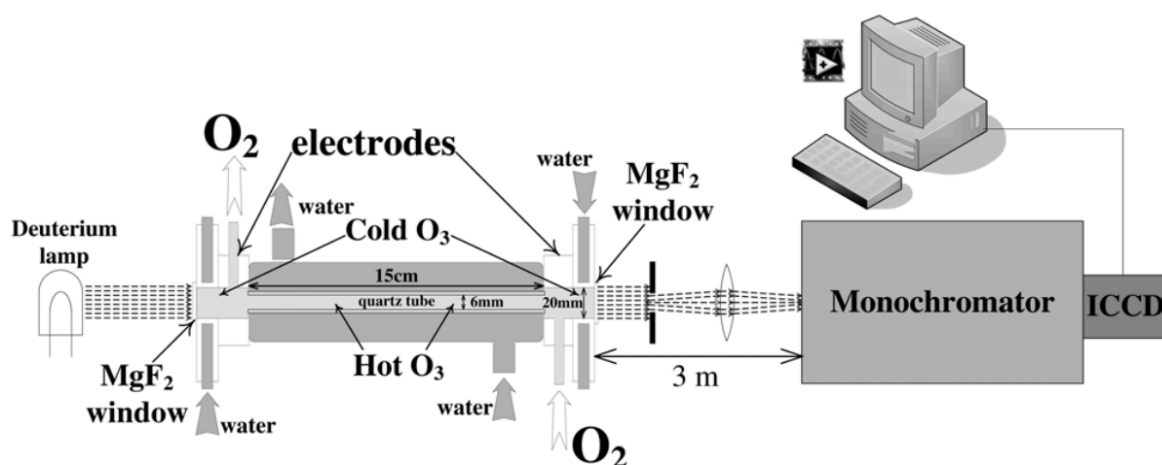


Рис.4 Экспериментальная установка

Поскольку рекомбинация O и O_2 на начальном этапе происходит с образованием озона на верхних колебательных уровнях, внутри области разряда идет непрерывный поток энергии к этим уровням, и поэтому в области разряда озон может иметь колебательную температуру, превышающую температуру газа. Назовем такой озон "горячий". В областях вне разряда рядом с окнами MgF_2 озон быстро релаксирует от колебательного возбуждения. Из-за низкой скорости потока газа и высокой скорости потерь O_3 в объеме трубки озон может накапливаться в этих областях, причем колебательная температура так называемого "холодного" озона здесь значительно ниже. Она равна температуре газа, которая фактически равна температуре стенки (металлических электродов), примерно 295 К. Наблюдаемый спектр поглощения озона представляет собой сумму поглощений "горячего" и "холодного" озона. Зная "холодный" спектр поглощения озона и параметры "горячего" и "холодного" озона, мы можем получить спектры "горячего" озона внутри разрядной трубки.

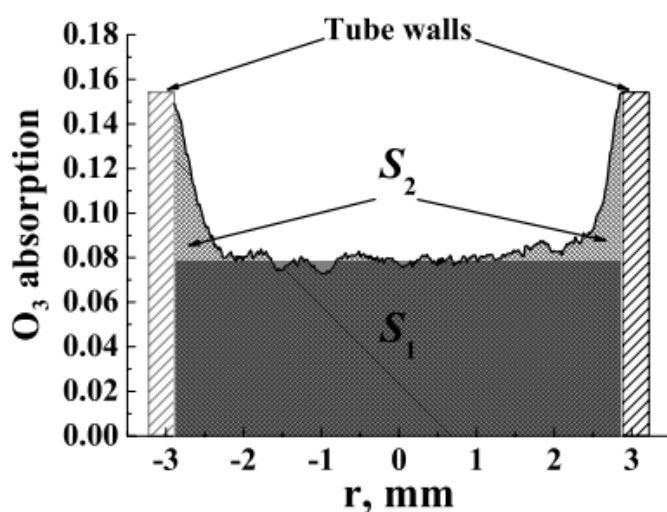


Рис. 5 Характерный профиль поглощения озона на длине волны 260 нм (40 Торр, 105 мА см⁻²). Постоянное поглощение в темной области S1 соответствует поглощению «холодного» озона вблизи окон MgF2 за пределами трубки. Светлая область S2 над постоянным уровнем поглощения соответствует поглощению «горячего» озона внутри трубки.

Как хорошо видно на рисунке 5, поглощение O₃ постоянно почти по всему диаметру трубки и резко возрастает вблизи стенок трубки. Постоянный уровень поглощения O₃ соответствует поглощению «холодным» O₃ за пределами разряда у окон, тогда как пики поглощения вблизи стенок соответствуют поглощению «горячим» O₃. Это говорит о наличии отрицательного градиента плотности озона от стенок к центру трубки. Потери озона в трубке происходят главным образом в объеме разряда. Радиальные профили поглощения показывают, что "горячий" озон формируется у стенок и теряется в объеме трубки. Следует подчеркнуть, что «измеренная» колебательная температура озона была заметно выше пристеночной температуры газа во всех исследуемых условиях. Это, очевидно, свидетельствует о существовании в разряде некоего источника колебательного возбуждения O₃. Таким источником может быть возбуждение электронным ударом и в химических реакциях, прежде всего, в рекомбинации трех тел O и O₂. Детальный анализ данных, извлеченных из кинетической модели и рассчитанных в феноменологической модели поверхностных процессов, выявил важную роль синглетных молекул кислорода в образовании озона на поверхности. Даже небольшая концентрация (несколько процентов) синглетного кислорода может повлиять на образование озона на поверхности. Скорость образования O₃ на поверхности напрямую зависит от плотности адсорбированных атомов и молекул кислорода и может быть высокой при увеличении давления и энергии, поступающей в плазму, при одновременном поддержании температуры поверхности на достаточно низком уровне. Итак, концентрация озона уменьшается в центре разряда вблизи оси трубки, где плотности атомов кислорода и электронов, а также температура газа максимальны. Максимум концентрации озона наблюдается вблизи стенки трубки, где плотности электронов и атомов уже достаточно малы. Установлено, что скорость образования O₃, оцененная по градиенту экспериментально наблюдаемой концентрации O₃ вблизи стенки, заметно выше скорости трехтельной газофазной рекомбинации атомов и молекул кислорода. Это позволило предположить, что источником озона и его колебательного возбуждения является рекомбинация атомарного и молекулярного кислорода на стенке трубки, играющей роль третьего тела. Кроме того, важную роль играют синглетные молекулы. Эти данные открывают возможности для создания компактных мощных озонаторов с высоким выходом озона и относительно высокой энергоэффективностью.

Динамика

В [2] использовалась импульсно-модулированная постоянная разрядная плазма в чистом кислороде. Разряд модулировался - включался на 0,2 с, а затем выключался на 1 с. Импульсно-модулированный режим использовался для изучения поверхностных процессов образования и потерь озона, а также кинетики колебательно-возбужденного озона в отсутствие активной плазмы. Модуляция разряда была важна по следующим причинам:

1. Она позволяла отделить процессы, происходящие в активной плазме разряда, от процессов в послесвечении, когда отсутствует ионизация и возбуждение электронным ударом.
2. В послесвечении можно было наблюдать медленные процессы, такие как образование и распад озона, без влияния быстрых процессов в активной плазме.
3. Модуляция обеспечивала квазистационарные условия в активной фазе разряда, что упрощало моделирование и интерпретацию результатов.
4. Временное разрешение позволяло детально исследовать кинетику кислородных атомов и озона в послесвечении и сравнивать с моделированием.

Далее, согласно [2], температура стенки, ток разряда и давление оказывали существенное влияние на образование озона в послесвечении.

Влияние температуры стенки:

1. Скорость образования O_3 на поверхности стенок зависит от температуры стенки T_w и может быть высокой при низкой T_w .
2. Вероятность потери озона на поверхности γO_3 увеличивается с ростом T_w по закону Аррениуса: $\gamma O_3 \sim 0.002 \times \exp(-1350/T_w)$.
3. При повышении T_w с 293K до 323K наблюдалось более быстрое убывание концентрации O_3 в позднем послесвечении из-за увеличения γO .

Влияние тока разряда:

1. Увеличение тока разряда I_d приводит к росту концентраций O , $O_2(a)$ и O_3 в активной фазе разряда.
2. Это обеспечивает более высокую начальную концентрацию O и O_2 для образования O_3 на поверхности в послесвечении.

3. Максимальная концентрация O_3 в послесвечении растет с увеличением I_d .

Влияние давления:

1. При повышении давления p от 5 до 50 Торр максимальная концентрация O_3 в послесвечении сначала растет, достигая максимума при $p \sim 20$ Торр.
2. При дальнейшем росте $p > 20$ Торр концентрация O_3 снижается из-за увеличения скорости объемных реакций распада озона с O и $O_2(a)$.
3. Скорость образования O_3 на поверхности может быть высокой при повышенном давлении из-за большей плотности физосорбированных O и O_2 .

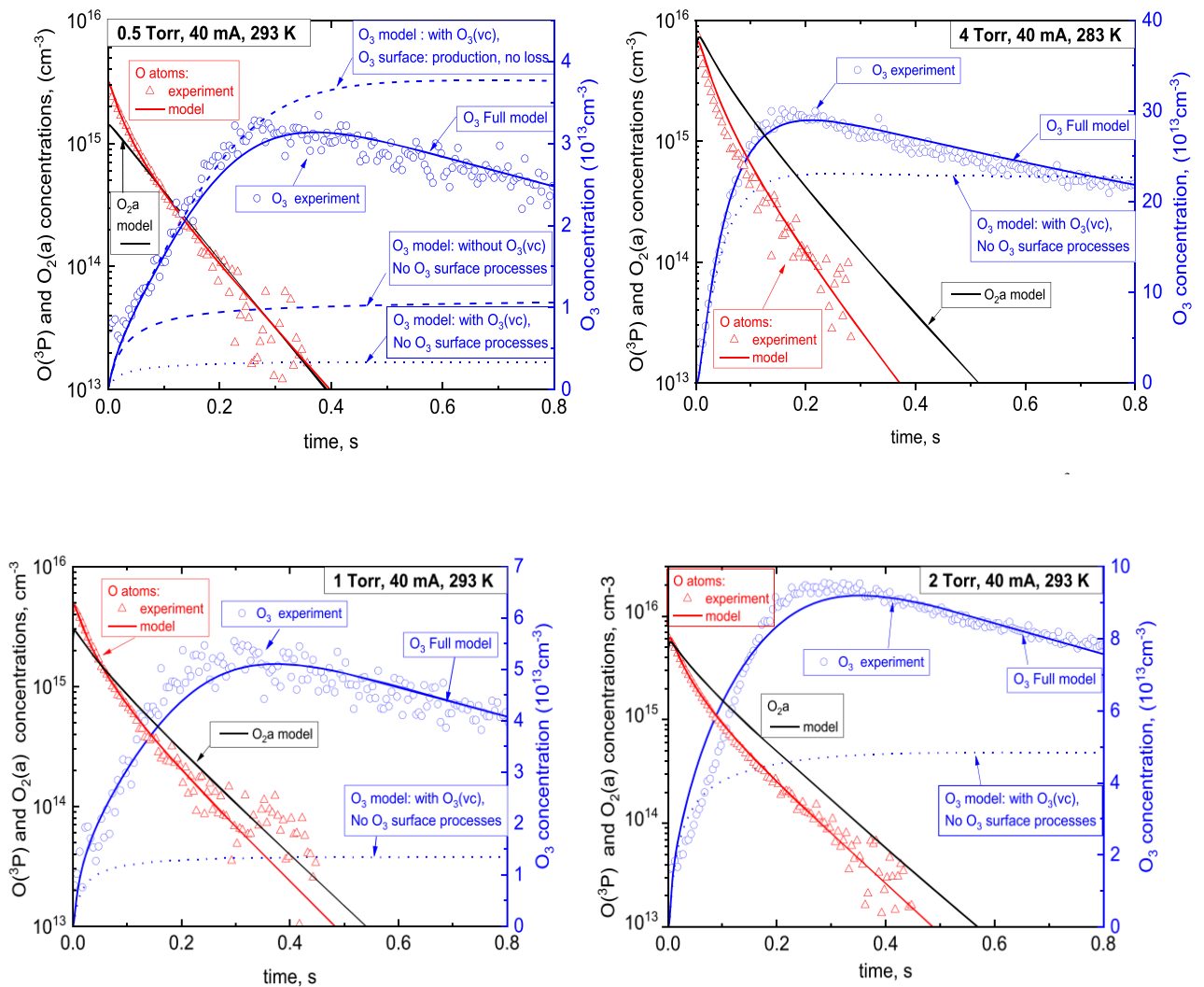


Рис. 6 Эволюция измеренных ($O_3(0,0,0)$, $O(^3P)$) и расчетных ($O_3(0,0,0)$, $O(^3P)$, $O_2(a)$) осевых концентраций в послесвечении разряда O_2 для разных давлений, токов и температур.

Таким образом, низкая температура стенки, высокий ток разряда и оптимальное промежуточное давление (около 20 Торр) способствуют максимальному выходу озона в послесвечении разряда в чистом кислороде. Также подробно исследуется динамика концентраций кислородных атомов O , озона O_3 и синглетного кислорода $O_2(a)$ в послесвечении импульсно-модулированного разряда в чистом кислороде. Основные результаты касательно концентраций:

1. Концентрация атомов кислорода $O(3P)$ быстро падает после выключения разряда из-за объемных реакций рекомбинации и поверхностных потерь на стенках трубки.[1]
2. Концентрация озона O_3 сначала растет в послесвечении, достигая максимума через $\sim 0.1-0.2$ с, а затем медленно убывает. Это указывает на продолжающееся образование озона после выключения разряда за счет поверхностных процессов.
3. Наблюдается значительная концентрация колебательно-возбужденного озона $O_2(vib)$ вблизи стенок трубки в активной фазе разряда. В послесвечении $O_2(vib)$ быстро релаксирует.
4. Концентрация синглетного кислорода $O_2(a)$ быстро падает в послесвечении из-за реакций с озоном и поверхностного тушения.
5. Максимальная концентрация озона в послесвечении зависит от давления, тока разряда и температуры стенки. Оптимальные условия - промежуточное давление ~ 20 Торр, высокий ток и низкая температура стенки.
6. Разработанная 1D модель с учетом поверхностных процессов образования/потерь озона и кинетики колебательно-возбужденного озона хорошо описывает экспериментальные данные по динамике концентраций O_2 , O и $O_2(a)$.

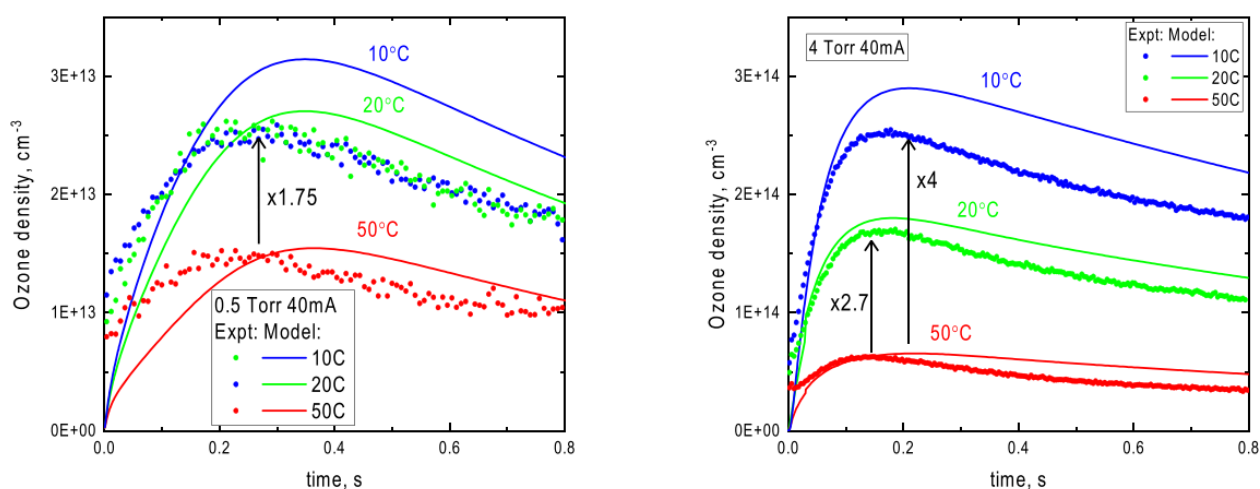


Рис. 7 Динамика послесвечения O_3 в зависимости от температуры стенки при значениях

давления 0,5 Торр и 4 Торр. Экспериментальные измерения отображаются в виде точек, результаты модели — в виде линий.

Плотность атомов О в послесвечении затухает неэкспоненциально, что указывает на вероятность потери поверхности, зависящую от падающих потоков активных частиц. Пик поглощения атомов кислорода лежит на изменяющемся во времени континууме поглощения из-за (в послесвечении) полос Шаппюи озона. Плотность озона в послесвечении лишь незначительно зависит от величины разрядного тока, что означает, что главный механизм образования не связан непосредственно с активными веществами, такими как атомы кислорода. Тем не менее, плотность O_3 заметно возрастает с давлением газа, а также значительно выше при температуре стенки 10 °С по сравнению с 20 °С. 10 С по сравнению с 20 С. Эти наблюдения не согласуются с образованием озона в газовой фазе в результате реакции (1), которая в любом случае не может объяснить количество озона, образующегося при более низких давлениях (2 Торр и ниже). Таким образом, результаты указывают на поверхностное образование озона в результате реакции молекулярного O_2 (отсюда зависимость от давления) с адсорбированными атомами кислорода. На этот механизм реакции также могут влиять экзотермические реакции молекул $O_2(a)$, которые могут удалять атомы кислорода с поверхности за счет образования нестабильного электронно-возбужденного озона O_3^* , который затем диссоциирует на $O_2 + O$.

В итоге, в данной работе были еще раз подтверждены механизмы образования озона и их связь с поверхностью трубки, а также проведены исследования динамики концентрации озона в условиях послесвечения.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работах, описанных выше, описаны методы, позволяющие определить колебательную температуру и концентрацию озона в разряде и их зависимость от условий среды. Планируется провести аналогичный эксперимент методом УФ-поглощения в модулированном разряде постоянного тока.

Ожидается, что измерив амплитуду поглощения мы сможем получить концентрацию озона, то есть проинтегрировав спектр, мы получим число молекул озона. Исследовав форму спектра, можно получить распределение молекул по нижним колебательным состояниям. Так как инверсную заселенность озона получить не получится, вводится критерий для анализа

спектра: на верхних состояниях молекул меньше, чем на нижних. Тогда в первом приближении можно получить населенность нижних состояний. Таким образом, можно оценить характерную колебательную температуру. Из имеющихся статей есть предположение, что характерные колебательные температуры газовой температуры, что приведет к неравновесности системы системы. Моделирование будет основано на работе [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый эксперимент по измерению динамики образования колебательно-возбужденного озона методом УФ-поглощения в модулированном разряде тока позволит более детально исследовать этот процесс. Использование расчетных спектров поглощения различных колебательных состояний озона в сочетании с пространственно-разрешенными измерениями спектров поглощения даст возможность извлечь распределение молекул озона по колебательным уровням и оценить колебательную температуру в плазме разряда, а также вклад поверхности в образование озона. Полученные результаты будут важны для понимания роли колебательного возбуждения озона в плазмохимических процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] D V Lopaev, E M Malykhin and S M Zyryanov, Surface recombination of oxygen atoms in O₂ plasma at increased pressure: II. Vibrational temperature and surface production of ozone – J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 015202 (16pp)
- [2] J-P Booth, O Guaitella, S Zhang, D Lopaev, S Zyryanov, T Rakhimova, D Voloshin, A Chukalovsky, A Volynets and Yu Mankelevich, Oxygen atom and ozone kinetics in the afterglow of a pulse-modulated DC discharge in pure O₂ : an experimental and modelling study of surface mechanisms and ozone vibrational kinetic –Plasma Sources Sci. Technol. 32 (2023) 095016 (20pp)
- [3] В.Лунин, М.П. Попович, С.Н. Ткаченко, Физическая химия озона–Издательство Московского Университета
- [4] Rawlins W T, Caledonia G E and Armstrong R A 1987 J. Chem. Phys. 87 5209–21
- [5] D V Lopaev, E M Malykhin and V A Namiot, UV absorption of vibrationally excited ozone–J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 41 (2008) 085104 (12pp)