

На правах рукописи

Авдеев Сергей Михайлович

**УЗКОПОЛОСНЫЕ ИСТОЧНИКИ
СПОНТАННОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА:
ИССЛЕДОВАНИЕ, СОЗДАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ**

01.04.05 - оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры квантовой электроники и фотоники ТГУ Соснин Эдуард Анатольевич.

Официальные оппоненты:

кандидат физико-математических наук Герасимов Владимир Алексеевич, старший научный сотрудник лаборатории квантовой электроники Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск).

доктор физико-математических наук Соколова Ирина Владимировна, главный научный сотрудник лаборатории фотофизики и фотохимии молекул Томского государственного университета.

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»

Защита состоится «18» октября 2007 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.267.04 по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора физико-математических наук при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, ауд. 119.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета.

Автореферат разослан «07» сентября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

/Б.Н. Пойзнер/

Актуальность работы. Интерес к изучению источников спонтанного излучения на эксимерных и эксиплексных молекулах (эксиламп) [1*–6*], становление которых как самостоятельного класса излучающих систем началось сравнительно недавно, возник около 30-ти лет назад после активного изучения эксиплексных лазеров и кинетических процессов, происходящих в их активных средах.

К настоящему времени исследования эксиламп вышли на высокий научно-технический уровень. Эксилампы обеспечивают узкополосное излучение в вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ, 100–200 нм) и ультрафиолетовом (УФ-С, 200–280 нм; УФ-Б, 280–320 нм) областях спектра. В научных и прикладных целях начинают активно использоваться эксилампы на эксимерных Xe_2^* (172 нм) и эксиплексных KrCl^* (222 нм), XeBr^* (282 нм), XeCl^* (308 нм) молекулах. Такие источники начинают рассматриваться как возможная альтернатива традиционным источникам ультрафиолетового излучения: ртутным лампам среднего и высокого давления, а также ксеноновым и криптоновым лампам дугового разряда, выпускаемым серийно. Наибольшее распространение для возбуждения эксимерных и эксиплексных оптических сред эксиламп сегодня получала техника барьерного разряда.

Эксилампы хотя и уступают перечисленным источникам излучения по величинам средней мощности, имеют преимущества: их спектр, как правило, сосредоточен в одной сравнительно узкой и интенсивной полосе излучения с полушириной полосы от 2 до 15 нм для эксиплексных и до ~ 30 нм для эксимерных молекул. Поэтому с их помощью можно *селективно* управлять различными фотопроцессами, замещая в ряде случаев технически сложные лазерные системы или традиционные широкополосные лампы. Отметим также высокие сроки службы оптической среды и, соответственно, стабильность во времени спектральных и энергетических характеристик; возможность варьирования в широких пределах энергии возбуждения и давления рабочих смесей; разнообразие конструкций, возможность их масштабирования и простоту эксплуатации.

Стоит подчеркнуть, что барьерный разряд может быть использован для получения узкополосного излучения не только эксимерных и эксиплексных сред. Поэтому, несмотря на широкий круг исследований эксиламп, здесь, как и в лазерной физике, актуальны поиск новых оптических сред и условий достижения их максимальных энергетических характеристик.

Так среди эксиламп на эксиплексных молекулах УФ-А (320–400 нм) диапазон спектра представлен лишь люминесценцией молекулы XeF^* (351 нм). Но поскольку фторсодержащие галогеноносители приводят к коррозии материала колбы, такой источник не обеспечивает стабильности спектра

излучения и высокого срока службы оптической среды. Возможной альтернативой ХеF-эксиллампам в УФ-А диапазоне может стать источник спонтанного излучения на молекулах йода I_2^* (342 нм).

В диапазонах УФ-Б и УФ-С малоизученными остаются спектральные и энергетические характеристики димеров галогенов (дигалогенов) Cl_2^* , Br_2^* и совсем не изучена люминесценция гидроксила $\cdot OH^*$ в барьерном разряде.

За счёт выбора той или иной оптической среды и, соответственно, спектрального состава излучения, открывается возможность по исследованию селективного воздействия излучения на различные системы. Например, эксиллампы барьерного разряда на молекулах $KrBr^*$, $KrCl^*$ и $XeBr^*$ могут стать основой для новых методов УФ-дезинфекции водных и воздушных сред, поскольку обладают спектром излучения лежащим в бактерицидной области длин волн (200–300 нм).

Работа выполнялась в рамках: 1) международного проекта РФФИ-NWO «Сравнительное изучение действия плазмы атмосферного давления и узкополосного УФ-излучения на живые клетки и бактерии» № 04-02-89001-NWO_a (2005 г.) совместно с Eindhoven University of Technology (Голландия); 2) партнёрских проектов международного научно-технического центра № 2706 (2006–2007 гг.) и № 3583P (2007 г.).

Целью настоящей работы, начатой в 2004 г., являлся поиск оптических сред, обеспечивающих при возбуждении барьерным разрядом узкополосные спектры излучения в области длин волн 200–400 нм, экспериментальное исследование их спектральных и энергетических характеристик, создание на их основе новых источников спонтанного излучения и экспериментальные исследования бактерицидного действия таких источников.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Определение условий эффективной люминесценции $D' \rightarrow A'$ полосы дигалогенов I_2^* (342 нм), Cl_2^* (257,8 нм), Br_2^* (291 нм) в барьерном разряде.
2. Определение условий эффективной люминесценции $A \rightarrow X$ полосы гидроксила $\cdot OH^*$ (309 нм) в барьерном разряде.
3. Создание и исследование лабораторных образцов источников спонтанного излучения на молекулах I_2^* (342 нм), Cl_2^* (257,8 нм), Br_2^* (291 нм) и гидроксила $\cdot OH^*$ (309 нм), возбуждаемых барьерным разрядом.
4. Анализ и оценка данных о бактерицидном действии УФ-излучения и создание эксилламп с наибольшей бактерицидной эффективностью.
5. Поиск новых способов снижения уровня озонирования источников УФ-излучения.

Методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось на основе лабораторных и натуральных экспериментов, математических оценок. В

исследованиях оптических сред применялись стандартные методики спектральных и энергетических измерений с использованием современных измерительных приборов. В части, посвящённой исследованию бактерицидного действия излучения эксилламп, применялись препаративные и оценочные методы микробиологии (метод Коха для кратных разведений). В части, посвящённой апробации метода снижения уровня озонирования ХеСl-эксилламп, использовались стандартный колориметрический метод регистрации озона в водном растворе крахмал-йод.

Положения, выносимые на защиту:

1. В эксиллампах барьерного разряда на основе смесей Kr-I₂ и Ar-I₂ при общих давлениях до 480 и 700 Торр, соответственно, достигается максимальная интенсивность излучения D'→A' полосы I₂* с эффективностью излучения 0,6%. Величину КПД излучения ограничивает малая эффективность (~1%) образования I₂*(D') в плазме.
2. В эксиллампах барьерного разряда на основе смесей Ar-Cl₂ и Ar-Br₂ максимальная интенсивность излучения D'→A' полос дигалогенов Cl₂* и Br₂* достигается при общих давлениях 300–350 Торр и соотношениях концентраций Ar/Cl₂ = 400/1, Ar/Br₂ = 400/1, а эффективность излучения достигает значений 1,5% и 2,3%, соответственно.
3. В смеси аргона с парами воды, возбуждаемой барьерным разрядом, максимальная эффективность (до 0,3%) излучения перехода A→X полосы гидроксид-радикала ·OH* с максимумом излучения на 309,11 нм достигается при соотношениях давлений Ar/H₂O = 300/1,5 Торр.
4. Соотношение интенсивностей излучения молекул KrBr*(207 нм)/Br₂*(291 нм) = 2,5/1 в спектре излучения KrBr-эксилламп барьерного разряда адекватно структуре спектра поглощения дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), с максимумами в диапазонах 200–220 и 240–290 нм.
5. Плёнки на основе диоксида гафния (HfO₂), прозрачные для оптического излучения с λ > 213 нм, снижают образование озона на границе кварц / воздух не менее, чем в 6 раз.

Достоверность защищаемых положений и других результатов подтверждается: 1) согласием экспериментальных данных с результатами работ других авторов в случае близких условий проведения экспериментов, например, наблюдение однородной формы барьерного разряда в I₂-эксиллампе [7*]; преобладание люминесценции A→X полосы гидроксид-радикала ·OH* в смесях паров воды с аргоном при высоких давлениях, возбуждаемых пучком электронов [8*]; 2) совпадением результатов воздействия различных компонентов плазмы атмосферного давления на микроорганизмы с результатами [9*]; 4) согласием полученных данных о бактерицидном эффекте

эксилламп с данными об инактивации ДНК ультрафиолетовым излучением [10*]; 5) использованием стандартной методики, применяемая для индикации сильных окислителей [11*] для оценки концентрации озона в растворе крахмал-йод.

Новизна полученных результатов:

1. Определены условия интенсивной люминесценции полосы $D' \rightarrow A'$ дигалогенов (I_2^* , Cl_2^* , Br_2^*) в барьерном разряде, и проведены оценки эффективности излучения I_2 -, Cl_2 - и Br_2 -эксилламп (2006–2007 гг.).
2. Установлена зависимость между интенсивностью излучения атомарной линии йода (206,2 нм) и интенсивностью полосы $D' \rightarrow A'$ молекулярного йода I_2^* в спектре излучения плазмы барьерного разряда от давления буферного газа в смеси Kr- I_2 (2007 г.).
3. Получена интенсивная люминесценция $A \rightarrow X$ полосы гидроксила $\cdot OH^*$ в барьерном разряде (2006 г.).
4. Доказано инактивирующее действие излучения молекул KrBr*(207 нм) и Br_2^* (291 нм) KrBr-эксилламп на бактерии (Патент RU 43458. Приоритет 27.09.2004).
5. На примере KrBr- и XeBr-эксилламп барьерного разряда показано, что для эффективной инактивации микроорганизмов спектр излучения источников бактерицидного излучения должен соответствовать максимумам поглощения ДНК микроорганизмов (2004–2005 гг.).
6. Предложено и апробировано покрытие на основе диоксида гафния HfO_2 для поверхности кварцевой колбы источника УФ-излучения (на $\lambda > 213$ нм), снижающего уровень озонирования в окружающем пространстве (Заявка на патент № 2006138756/09. Приоритет от 02.11.06).

Научная ценность:

1. Определены условия интенсивной люминесценции полосы $D' \rightarrow A'$ дигалогенов (I_2^* , Cl_2^* , Br_2^*) и $A \rightarrow X$ полосы гидроксила $\cdot OH^*$ в барьерном разряде.
2. Полученные экспериментальные данные об условиях интенсивной люминесценции полосы $D' \rightarrow A'$ дигалогена I_2^* в смеси Kr- I_2 в барьерном разряде позволили раскрыть механизмы низкой эффективности излучения полосы I_2^* .
3. Созданный источник оптического излучения на переходе $D' \rightarrow A'$ дигалогена I_2^* позволяет решать научно-исследовательские задачи в фотобиологии (например, в осуществлении фотореактивации микроорганизмов и живых клеток, фоторегуляции роста растений).

4. Получены данные о спектральном составе KrBr-эксилампы барьерного разряда, оптимальном для инактивации микроорганизмов, необходимой, например, для дезинфекции.
5. Предложены две гипотезы образования озона от источников УФ-излучения на границе кварц / воздух.

Практическая значимость:

1. Созданная Cl₂-эксилампа барьерного разряда с максимумом излучения на 257,8 нм обладает мощностью до 0,5 Вт.
2. Созданная I₂-эксилампа с максимумом излучения на 342 нм обеспечивает мощность и излучения до 0,5 Вт.
3. Созданная лампа на молекулах *ОН* обладает мощностью излучения до 1,1 Вт. Спектр лампы, согласно данным фотомедицины, пригоден для лечения ряда кожных заболеваний.
4. Предложенная KrBr-эксилампа барьерного разряда увеличивает бактерицидную эффективность.
5. Предложенный способ модификации гафноном кварцевой поверхности источников ультрафиолетового излучения на $\lambda > 213$ нм повышает озонобезопасность их эксплуатации.

Сведения о внедрении результатов диссертации:

- С 2004 г. по настоящее время KrBr-эксилампа применяется на кафедре цитологии и генетики Биологического института при ТГУ, в рамках изучения инактивирующего воздействия ультрафиолетового излучения (УФ-С) на патогенные микроорганизмы.
- С 2006 г. по настоящее время I₂-эксилампа применяется на кафедре физиологии и биотехнологии растений Биологического института при ТГУ для изучения воздействия ближнего ультрафиолетового излучения (УФ-А, 342 нм) на рост растений.
- Пять KrBr-эксиламп барьерного разряда ($\lambda = 207$ нм) мощностью излучения не менее 0,3 Вт поставлены 17 августа 2005 г. в SEN ENGINEERING CO., LTD по договору № JP-30/04.
- Cl₂-эксилампа барьерного разряда ($\lambda \sim 258$ нм) мощностью излучения не менее 0,3 Вт поставлена 24 января 2005 г. в НТЦ «Реагент» по договору № 222/2005.

Апробация работы:

- Международная конференция Atomic and Molecular Pulsed Lasers VI, Томск, Россия, (2005 г.);
- Региональная конференция ВНКСФ-11, Екатеринбург, Россия (2006 г.);
- VI школа семинар молодых ученых «Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития», Томск, Россия (2006 г.);

- X Международная школа-семинар по люминесценции и лазерной физике, Иркутск, Россия (2006 г.);
- Международная конференция «Светотехника», Калининград, Россия (2006 г.).

Личный вклад:

Основные результаты диссертации получены лично автором, либо при его прямом участии. При его непосредственном участии были проведены постановка, подготовка и выполнение экспериментов, а также обработка и интерпретация результатов экспериментов. Так на основании экспериментальных данных для смеси $Kr-I_2$ с.н.с. ГОУ ВПО «СПбГУ ИТМО» *Г.Н. Зверевой* было проведено моделирование плазмохимических процессов протекающих в барьерном разряде (**глава 3**). Эксперименты по инактивации микроорганизмов проводились на кафедре цитологии и генетики Биологического института при ТГУ с участием студентки *Е.А. Кузнецовой*, которая обеспечивала культивирование, посев и подсчет микроорганизмов (**глава 5**). Кроме того, в гл. 5 н.с. отдела теоретической физики ИСЭ СО РАН *А.И. Суловым* были проведены оценки потоков УФ-фотонов, озона и свободных радикалов на поверхность подложки для определения механизмов воздействия частиц плазмы атмосферного давления на бактериальные культуры. Моделирование химической реакции замещения йода молекулами озона в водном растворе крахмал-йод и оценка концентрации молекул озона в растворе, осуществлялась доц. химического факультета ТГУ к.х.н *Е.Б. Черновым* (**глава 6**).

Структура и объем работы:

Диссертация изложена на 151 листе машинописного текста, иллюстрируется 94 рисунками, 8 таблицами, состоит из Введения, шести глав, Заключения, Приложений (содержащих четыре справки о внедрении и техническую документацию) и списка литературы из 145 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы задачи исследований, приведены защищаемые положения, их новизна, научная и практическая ценность.

В **первой главе** дан обзор научной литературы, посвященный феномену барьерного разряда и его использованию для возбуждения оптических сред. В п. 1.1 раскрываются основные свойства плазмы барьерного разряда, проводится сравнение тлеющего и барьерного разрядов. Основное отличие эксиламп барьерного разряда от имеющихся эксиламп тлеющего разряда, люминесцентных источников спонтанного излучения УФ-диапазона – узкополосный спектр излучения. До 80% и более общей мощности излучения может быть сосредоточено в относительно узкой (несколько нм на полувысоте

для эксиплексных молекул) полосе соответствующей молекулы. Таким образом, в ряде практических задач, в которых необходимо воздействие узкополосного УФ-, ВУФ-излучения, эксилампы могут быть альтернативой лазерным системам, как более дешевые и простые в эксплуатации источники излучения.

На примере молекул Xe_2^* и XeCl^* даны механизмы образования эксимерных и эксиплексных молекул, и, соответственно, схемы их потенциальных уровней. В пп. 1.2 и 1.3 приведены спектры излучения эксимерных и эксиплексных молекул, димеров галогенов (I_2^* , Br_2^* , Cl_2^* и F_2^*), полученные в барьерном разряде. В п. 1.4 приведены основные конструкции ламп барьерного разряда, а также обоснованы преимущества двухбарьерных эксиламп («безэлектродных»), обеспечивающих высокие сроки службы рабочих смесей и чистоту спектрального состава излучения.

Поиск новых оптических сред для получения лазерной генерации в 70-е годы XX в. привел к использованию дигалогенов и созданию F_2^- , Br_2^- , Cl_2^- , I_2^- лазеров. Гораздо менее изученными оставались спектральные и энергетические характеристики спонтанного излучения возбужденных дигалогенов X_2^* . В пп. 1.5.1–1.5.3 дается обзор научных исследований, формирующих предпосылки для получения узкополосной люминесценции $\text{I}_2^*(342 \text{ нм})$, $\text{Br}_2^*(291 \text{ нм})$, $\text{Cl}_2^*(258 \text{ нм})$ молекул в барьерном разряде. К началу диссертационной работы спонтанное излучение X_2^* было получено в барьерном разряде для Cl_2^* [6*] и Br_2^* , I_2^* , F_2^* , Cl_2^* [5*], различных условиях тлеющего разряда для I_2^* , Br_2^* и Cl_2^* [12*–15*]. Изучали флюоресценцию молекулярного хлора и хлорсодержащих смесей при возбуждении излучением синхротрона [16*] и ксеноновой лампой низкого давления [17*]. Наблюдали флюоресценцию Br_2^* , индуцированную излучением F_2 -лазером [18*].

Задача получения узкополосного УФ-излучения может быть решена не только за счет использования в качестве оптических сред эксимеров (R_2^*), эксиплексов (RX^*) и дигалогенов (X_2^*). Интересной, с точки зрения создания источника узкополосного УФ-излучения, является оптическая среда на основе гидроксила $\cdot\text{OH}$. Наиболее интенсивные полосы в спектре излучения молекулы $\cdot\text{OH}^*$ соответствуют $\text{C}\rightarrow\text{A}$ и $\text{B}\rightarrow\text{X}$ переходам, лежащим в ВУФ-области (130–200 нм) [19*], а также переходу $\text{A}\rightarrow\text{X}$ с максимумом интенсивности в полосе 306–315 нм [20*, 21*]. Решение задачи поиска условий, в которых люминесценция $\text{A}\rightarrow\text{X}$ полосы гидроксила $\cdot\text{OH}^*$ доминирует, позволило бы создать источник излучения, близкий по своим спектральным характеристикам к спонтанному излучению эксиплекса $\text{B}\rightarrow\text{X}$ полосы молекулы $\text{XeCl}^*(308 \text{ нм})$, которое к настоящему времени находит свое применение при лечении кожных заболеваний и синтезе витамина D3 [21*]. В п. 1.5.4 приведен обзор научной

литературы об условиях получения люминесценции гидроксила OH^* . Показано, что вопрос о получении люминесценции $A \rightarrow X$ полосы молекулы $\text{OH}(^2\Sigma^+)$ в барьерном разряде ранее не изучался.

Во второй главе дано описание конструкций эксиламп барьерного разряда, используемых в экспериментах, а также экспериментальной аппаратуры и методик, с помощью которых были получены экспериментальные данные, помещенные в оригинальной части диссертационной работы.

В экспериментах посвященных исследованиям люминесценции молекул Cl_2^* , Br_2^* , I_2^* и гидроксила OH^* , а также в опытах с ХеСІ-эксилампой с пониженным уровнем озонирования использовались двухбарьерные (т.н. «безэлектродные») эксилампы коаксиального типа, изготовленные из кварца марок КУ-1 и Fused Quartz, Type 214 (General Electric). Длина рабочей области ламп составляла 9 см, площадь излучающей поверхности лампы составила 122 см^2 , величина разрядного промежутка $d = 8$ мм. Внешний электрод имел форму спирали и пропускание 86%. Сплошной электрод, размещенный во внутренней трубке, был изготовлен из алюминиево-магниевой фольги.

Возбуждение газовой среды в разрядном промежутке осуществлялось при подаче на электроды импульсного напряжения в форме меандра с амплитудой до 5,5 кВ и длительностью несколько микросекунд. Частота следования импульсов могла варьироваться от 18 до 120 кГц. Вводимая в плазму мощность зависела от амплитуды и частоты следования импульсов напряжения.

Для регистрации спектральных характеристик эксиламп в диапазоне 200–850 нм использовали спектрометр EPP2000C-25 (StellarNet Inc.) с известной спектральной чувствительностью на основе фотоприемника (п.з.с.-линейка Sony ILX511). Кроме того, в экспериментах спектр излучения эксиламп регистрировался с помощью калиброванного аппаратного комплекса, состоявшего из трех спектрометров HR4000 (Ocean Optics B.V.), перекрывавших спектральный диапазон 200–410 нм с решеткой 2400 штрихов/мм. Для оценки средней плотности мощности излучения эксиламп были использованы фотоприемник H8025-222 (HAMAMATSU PHOTONICS K.K.) и вакуумный фотодиод ФЭК-22 СПУ, с известными величинами спектральной чувствительности.

В экспериментах с йод-содержащими средами (пп. 3.1.1, 3.1.2) использовался кристаллический йод, частицы которого помещались в колбу. При зажигании разряда йод испарялся, и через некоторое время его давление уравнивалось давлением насыщенных паров и давлением инертного газа. Перед каждым опытом колба предварительно несколько раз циклически откачивалась и промывалась инертным газом.

В опытах по изучению действия УФ-излучения на микроорганизмы (пп. 5.5.1 и 5.5.2) в экспериментах использовались различные светофильтры (ПС-11 и кварцевая пластинка КУ-1) для разделения воздействия заряженных и нейтральных химически-активных частиц плазмы от излучения плазмы. Светофильтр ПС-11 отсекал излучение длин волн короче 220 нм и использовался для определения бактерицидной эффективности различных диапазонов широкополосного излучения плазмы атмосферного давления и полос $KrBr^*(207 \text{ нм})$ и $Br_2^*(291 \text{ нм})$ в спектре излучения $KrBr$ -эксилампы. В п. 5.5.2 использовались готовые УФ-облучатели модели ВД_Р (Институт сильноточной электроники СО РАН, лаборатория оптических излучений), в которых отпаянная колба эксилампы и источник питания были совмещены в едином корпусе.

Третья глава посвящена исследованиям энергетических и спектральных характеристик $D' \rightarrow A'$ полос дигалогенов $I_2^*(342 \text{ нм})$, $Cl_2^*(257,8 \text{ нм})$ и $Br_2^*(291 \text{ нм})$ в смесях с аргоном и с криптоном (только для молекулярного йода) в барьерном разряде.

В п. 3.1.1 описаны исследования I_2 -эксилампы барьерного разряда на смесях $Ar-I_2$. Спектральные и энергетические характеристики I_2 -эксилампы регистрировались в широких пределах давлений смеси $Ar-I_2$ от 0,2 до 1 атм. На рис. 1 приведен спектр излучения плазмы барьерного разряда в смеси $Ar-I_2$, зарегистрированный при общем давлении смеси $p = 330 \text{ Торр}$.

Спектр включает интенсивные линии атомарного йода с максимумом на 206,2 нм ($6s^2P_{3/2} - 2P_{1/2}$) и полосу $D' \rightarrow A'$ молекулярного йода с максимумом на 342 нм. В диапазоне 400–550 нм также присутствуют слабые континуумы I_2^* , которые наблюдались ранее в дуговом разряде паров йода [22*].

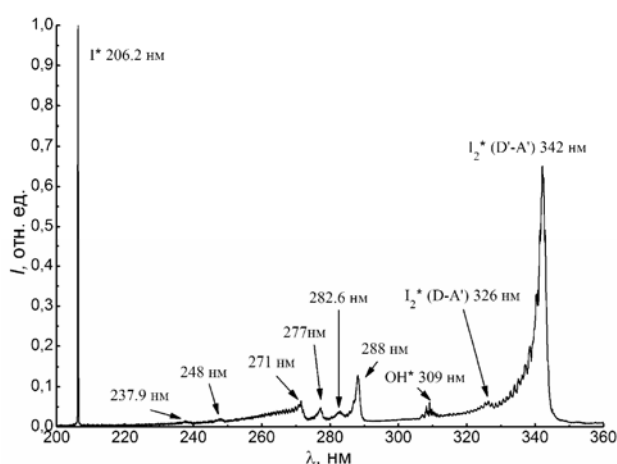


Рис. 1. Спектр I_2 -эксилампы барьерного разряда в смеси $Ar-I_2$, при общем давлении $p = 330 \text{ Торр}$.

Концентрация буферного газа определяет эффективность процессов столкновительной электронно-колебательной релаксации молекул I_2^* с более высоких возбужденных электронных состояний (например, с F или D) к состоянию D' . Таким образом, за счет повышенных давлений рабочей смеси (более 100 Торр) спектр излучения плазмы барьерного разряда содержит преимущественно узкую полосу излучения $D' \rightarrow A'$ перехода. Так до 50% энергии излучения

молекулярного йода (230–350 нм) сосредоточено в сравнительно узкой (2,3 нм на полувысоте) полосе $D' \rightarrow A'$ (рис. 1). Тогда как в тлеющем разряде (рабочие давления < 30 Торр) спектр излучения представлен системой широкополосных континуумов молекулярного йода сравнимых по интенсивности [12*].

Оценка средней мощности P и эффективности излучения η I_2 -эксилампы проводилась при различных давлениях буферного газа в смеси и при различных частотах следования импульсов напряжения f . Полученная максимальная мощность и эффективность излучения I_2 -эксилампы в диапазоне 200–550 нм, составили 475 мВт (общее давление Ar- I_2 смеси 700 Торр) и 1,6%, соответственно. Примечательной особенностью разряда I_2 -эксилампы является однородность горения, тогда как для эксиламп барьерного разряда на оксиплексных молекулах, характерна филаментарная форма разряда – наличие множества микроарядов на фоне однородного свечения плазмы.

В п. 3.1.2 представлены результаты исследований спектральных и энергетических характеристик I_2 -эксилампы барьерного разряда в смесях Kr- I_2 . В экспериментах варьировалось давление криптона в смеси Kr- I_2 в пределах 150–700 Торр. Так же как и в смеси Ar- I_2 в спектре излучения I_2 -эксилампы барьерного разряда на смеси Kr- I_2 присутствуют слабые полосы излучения в области 230–330 и 400–550 нм, интенсивный переход $D' \rightarrow A'$ и атомарная линия йода на 206,2 нм (рис. 2). Кроме того, в спектре наблюдается $D \rightarrow A$ переход KrI^* (225 нм).

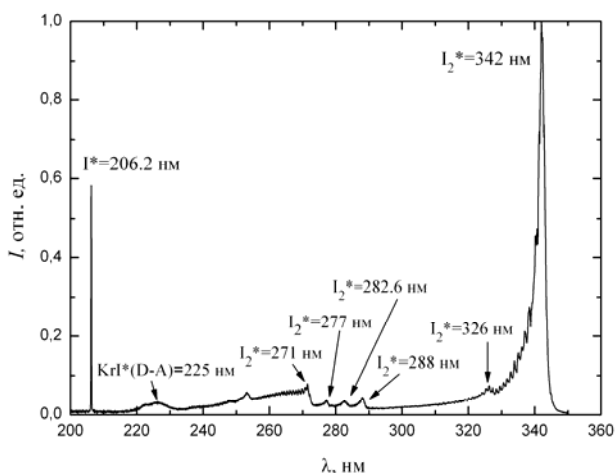


Рис. 2. Спектр I_2 -эксилампы барьерного разряда для смеси Kr- I_2 , давление смеси $p = 480$ Торр.

давление смеси Kr- I_2 составило 480 Торр. С ростом f до 71 кГц средняя мощность излучения также возрастала. Максимальная мощность излучения I_2 -эксилампы в области 480 Торр составила 550 мВт, при этом эффективность излучения лампы в диапазоне 200–550 нм, как и в смеси Ar- I_2 , составила 1,6%.

Сравнение зависимостей средней мощности излучения I_2 -эксилампы и интенсивности I_2^* от общего давления смеси (рис. 3) позволяет сделать вывод, что основной вклад в мощность излучения дает полоса $D' \rightarrow A'$ молекулярного йода.

Таким образом, меняя давление смеси можно подобрать условия, в которых люминесценция излучения I_2^* (342 нм) в барьерном разряде будет преимущественной и максимальной по мощности излучения. Оптимальное

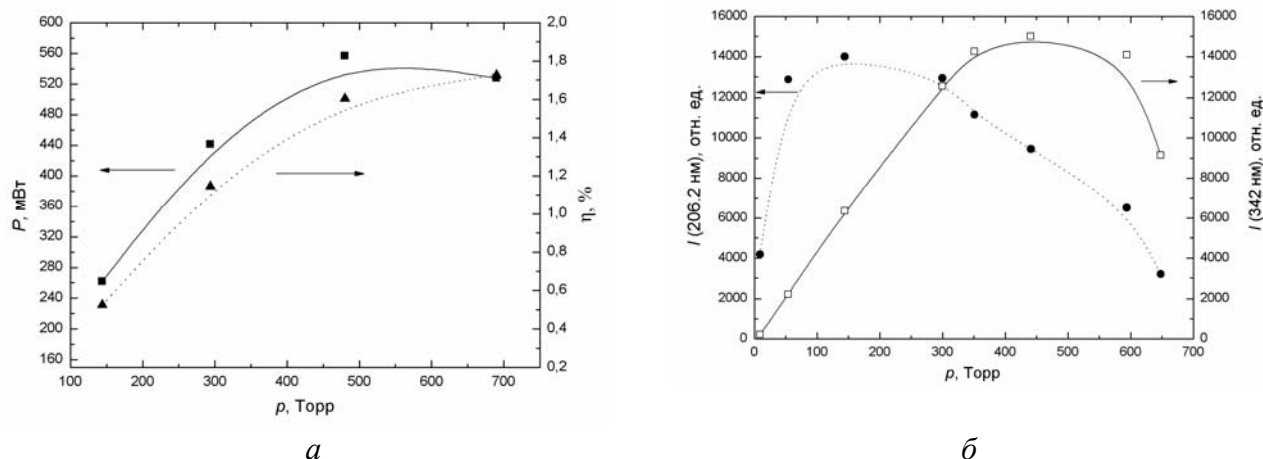


Рис. 3. Зависимость средней мощности излучения эксилампы от величины давления смеси (а). Влияние давления смеси на интенсивности излучения линии $I^*(206,2 \text{ нм})$ (слева) и полосы $I_2^*(342 \text{ нм})$ (справа), частота импульсов напряжения $f = 71 \text{ кГц}$ (б).

I_2 -эксилампа имела однородную форму горения разряда. Увеличение частоты импульсов напряжения более 80 кГц (так же как и в случае Ar- I_2 смеси) приводило к появлению микроразрядов в плазме, и в этом режиме средняя мощность и эффективность излучения I_2 -эксилампы падала.

На примере использования криптона в качестве буферного газа выявлено спектральное распределение излучения, когда полоса $D' \rightarrow A'$ преобладает над атомарной линией йода 206,2 нм – соотношение интенсивностей в спектре излучения $I^*(206,2 \text{ нм})/I_2^*(342 \text{ нм}) \sim 3/5$, когда мощность эксилампы максимальна (рис. 3, б).

На основании экспериментальных данных проводилось численное моделирование процессов, происходящих в плазме с содержанием паров йода менее 10% от общего давления смеси Kr- I_2 . Целью расчетов было объяснение закономерностей поведения излучения возбужденных молекул йода, выяснение каналов распределения энергии между различными процессами и предсказание параметров определяющих оптимальные условия по интенсивности и эффективности для излучения молекулы йода I_2^* на переходе $D'(^3P_{2g}) \rightarrow A'(^3P_{2u})$. Согласно расчетам низкий КПД излучения I_2 -эксилампы в $D' \rightarrow A'$ полосе I_2^* реализуется за счет малой эффективности образования $I_2^*(D')$ ($\sim 1\%$) в плазме.

Эффективность излучения $D' \rightarrow A'$ полосы I_2^* в смесях Kr- I_2 и Ar- I_2 , возбуждаемых барьерным разрядом составила 0,6%.

В п. 3.2 представлены результаты исследований люминесценции $D' \rightarrow A'$ полосы молекулярного хлора в барьерном разряде. Добавка инертного газа Ne, Ne или Ar вела к доминированию $D' \rightarrow A'$ полосы Cl_2^* с максимумом на 257,8 нм при давлениях газовой смеси более 100 Торр. Наибольшая интенсивность

излучения этой полосы получена при добавлении Ar. На рис. 4 представлен типичный спектр излучения смеси Ar-Cl₂ в барьерном разряде и средняя мощность излучения эксилампы в зависимости от давления и концентрации хлора в рабочей смеси.

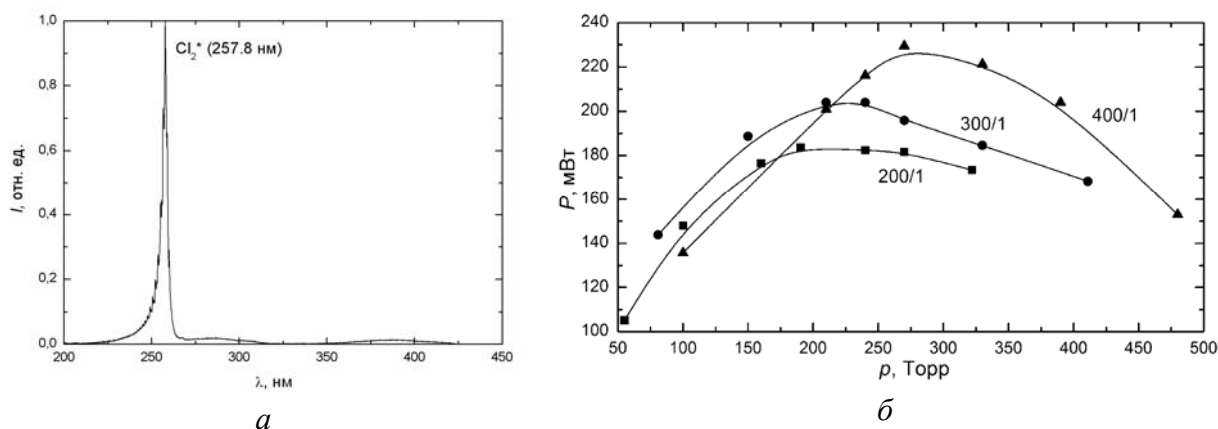


Рис. 4. Спектр излучения Cl₂-эксилампы барьерного разряда в смеси Ar/Cl₂ = 200/1 при давлении $p = 240$ Торр (а). Зависимость средней мощности излучения Cl₂-эксилампы от общего давления при различных соотношениях Ar и Cl₂, $f = 22$ кГц (б).

Уменьшение доли хлора в смеси ведет к увеличению мощности излучения D'→A' полосы Cl₂* (рис. 4). Наибольшая средняя мощность излучения составила 230 мВт при давлении около 280 Торр для смеси Ar/Cl₂ = 400/1 и $f = 22$ кГц. Увеличение средней мощности излучения Cl₂-эксилампы, с уменьшением концентрации галогена объясняется снижением эффективности процессов тушения Cl₂* молекулярным хлором. Дальнейшее снижение концентрации хлора в смеси Ar-Cl₂ приводило к обеднению смеси рабочими молекулами, и средняя мощность излучения эксилампы падала. Эффективность излучения D'→A' полосы молекулярного хлора Cl₂-эксилампы барьерного разряда достигала 1,5%.

В п. 3.3 представлены результаты исследования Br₂-эксилампы барьерного разряда. Наибольшие интенсивности излучения D'→A' полосы Br₂* (291 нм) были получены в смесях с аргоном. На рис. 5 (а) представлен спектр излучения плазмы барьерного разряда в смеси Ar-Br₂ при давлениях более 100 Торр. Влияние концентрации брома в рабочей смеси, общего давления на величину средней мощности излучения Br₂-эксилампы иллюстрируется рис. 5(б).

Наибольшая достигнутая средняя мощность излучения Br₂-эксилампы при частоте следования импульсов напряжения $f = 23$ кГц составила 330 мВт. Эффективность излучения D'→A' полосы молекулярного брома в спектре Br₂-эксилампы достигала 2,3%.

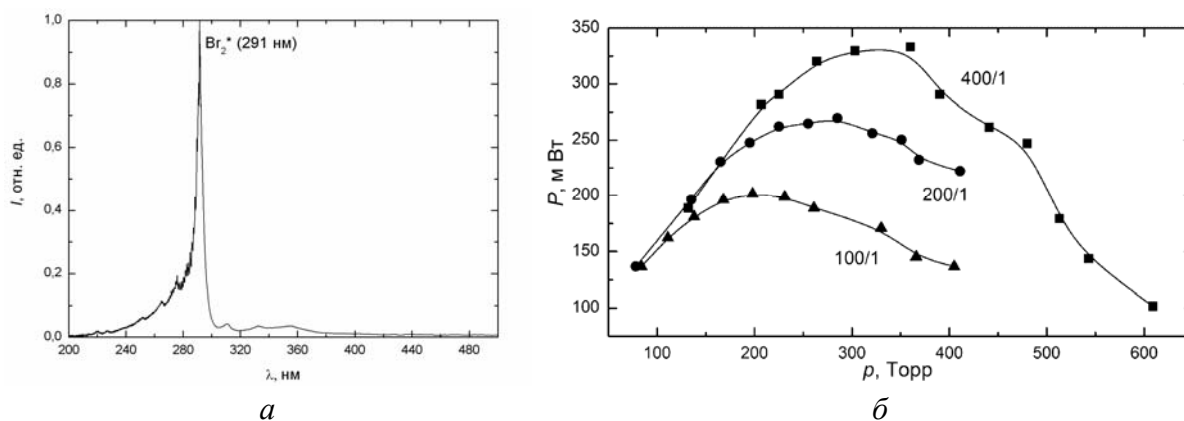


Рис. 5. Спектр излучения Br_2 -эксилампы барьерного разряда в смеси $\text{Ar}/\text{Br}_2 = 200/1$ при давлении 300 Торр (а). Зависимость средней мощности излучения Br_2 -эксилампы от давления смеси $\text{Ar}-\text{Br}_2$ и концентрации Br_2 , $f = 23$ кГц (б).

Четвертая глава посвящена исследованию энергетических и спектральных характеристик гидроксила OH^* в барьерном разряде в смеси с аргоном (п. 4.1). Представлены результаты первых ресурсных испытаний сроков службы лампы (п. 4.2).

В поисках оптимальных условий люминесценции $\text{OH}^* A(^2\Sigma^+, v' = 0) \rightarrow X(^2\Pi, v'' = 0)$ варьировались давления аргона и паров воды в колбе лампы.

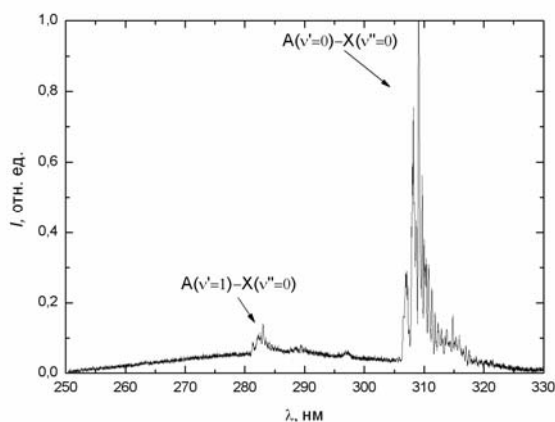


Рис. 6. Спектр излучения OH -лампы при давлении паров воды 1.5 Торр и аргона 300 Торр.

Спектр излучения молекул гидроксила (рис. 6) представлен интенсивным $A(^2\Sigma^+, v' = 0) \rightarrow X(^2\Pi, v'' = 0)$ континуумом с максимумом на 309,11 нм и значительно более слабым $A(^2\Sigma^+, v' = 1) \rightarrow X(^2\Pi, v'' = 0)$ переходом в области 283 нм. В тлеющем разряде [19*] в смесях гелий/пары воды (давление смеси до 60 Торр) интенсивность $A(^2\Sigma^+, v' = 1) \rightarrow X(^2\Pi, v'' = 0)$ перехода была несколько выше $A \rightarrow X$ континуума. В [19*] преобладание

$A(^2\Sigma^+, v' = 1) \rightarrow X(^2\Pi, v'' = 0)$ полосы над $A(^2\Sigma^+, v' = 0) \rightarrow X(^2\Pi, v'' = 0)$ переходом можно объяснить низкими рабочими давлениями, при которых излучательные переходы с более высоких колебательных состояний становятся более вероятны.

Максимальная эффективность излучения $A \rightarrow X$ полосы достигала 0,3% в смеси аргон/пары воды = 300/1,5 Торр. Проведены ресурсные испытания OH -лампы – она проработала 60 ч в непрерывном режиме без заметного снижения мощности. Двухбарьерная OH -лампа имеет потенциально высокий срок

службы по сравнению с лампами тлеющего разряда, так как цикл $\text{H}_2\text{O}^* \rightarrow \cdot\text{OH}^*(\text{A}) \rightarrow \cdot\text{OH} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$, завершающийся реакцией восстановления молекулы воды, обеспечивает постоянное наличие в колбе излучателя рабочих молекул, а отсутствие контакта с электродами предотвращает их реакцию с химически активными молекулами гидроксила.

Пятая глава посвящена сравнению бактерицидного действия излучения KrBr- и XeBr-эксиламп барьерного разряда на микроорганизмы и состоит из двух частей.

В первой части главы приведен литературный обзор (пп. 5.1–5.4), в котором показано, что основной причиной гибели микроорганизмов при УФ-облучении является инактивация ДНК [10*]. Отсюда формулируется предположение о том, что наибольшим инактивирующим действием будет обладать такой источник оптического излучения, спектр которого наилучшим образом соответствует структуре спектра поглощения ДНК. С этой точки зрения проведен сравнительный анализ существующих на сегодняшний день традиционных бактерицидных источников ультрафиолетового излучения и имеющийся опыт использования эксиламп. Дается обзор результатов по изучению бактерицидного действия плазмы низкого давления (до 0,25 Торр) [9*] и сделан вывод о перспективности использования эксиламп для целей инактивации. Он основан на том факте, что излучение эксиламп обладает *селективностью* действия (энергия расходуется исключительно в бактерицидном диапазоне спектра).

Во второй части главы в пп. 5.5.1 и 5.5.2 представлены экспериментальные результаты соискателя по изучению инактивирующего действия излучения KrBr-, XeBr-эксиламп и плазмы атмосферного давления на микроорганизмы *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*. В п. 5.5.1 описаны экспериментальная установка и условия воздействия плазмы атмосферного давления на микроорганизмы. Плазма атмосферного давления излучала в спектральном диапазоне 200–450 нм. Оценка энергии излучения сосредоточенного в спектральном интервале 200–450 нм показала, что до 84% энергии излучения лежит области длин волн 300–450 нм, которая бактерицидной не является. Проводилось как прямое облучение зараженной микроорганизмами подложки, так и опосредованное (между плазмой и подложкой помещались различные светофильтры ПС-11 и кварцевая пластинка КУ-1). Было установлено, что наилучшим инактивирующим действием обладает комбинация таких компонентов плазмы как ультрафиолетовое излучение (200–220 нм) и электронейтральные частицы (возбужденные атомы и молекулы, радикалы, различные окислы и пр.).

В п. 5.5.2 проводилось сравнительное воздействие излучения KrBr-, XeBr-эксиламп на *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus*. На рис. 7 представлены спектры излучения эксиламп и обобщенный спектр поглощения ДНК.

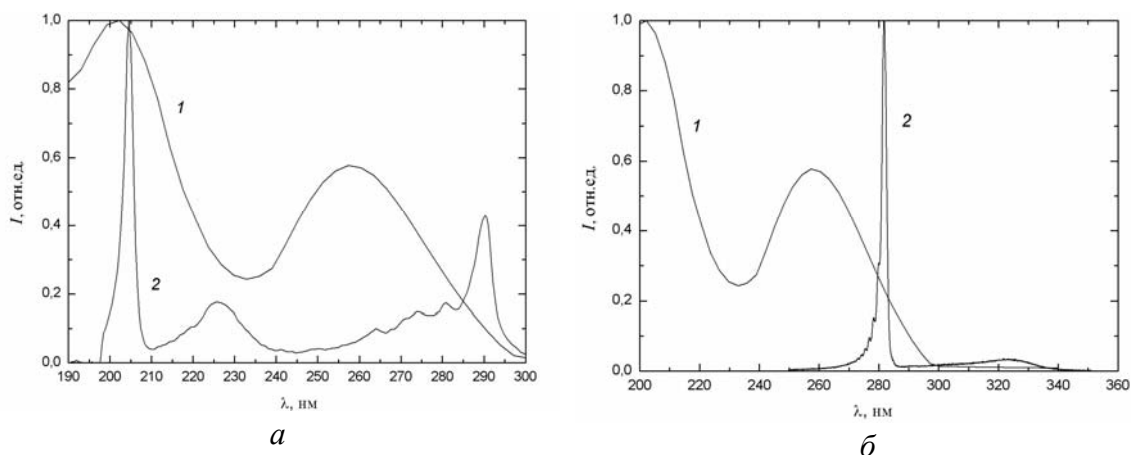


Рис. 7. Спектры поглощения ДНК (1) и излучения KrBr-эксилампы барьерного разряда (2) (а). Спектры поглощения ДНК (1) и излучения XeBr-эксилампы барьерного разряда (2) (б).

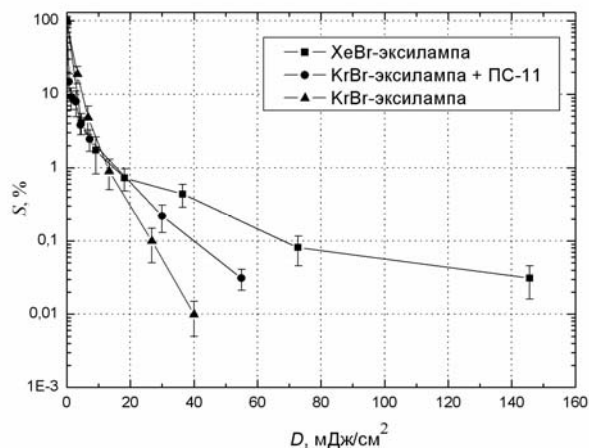


Рис. 8. Зависимость выживших *Staphylococcus aureus* от дозы облучения XeBr- и KrBr-эксилампами барьерного разряда.

Бактерицидная эффективность KrBr-эксилампы обусловлена тем, что её спектр излучения содержит полосы молекул KrBr*(207 нм) и Br₂*(291 нм), которые соответствуют максимумам поглощения ДНК (рис. 7, а).

В ходе экспериментальных исследований по оптимизации спектрального распределения излучения KrBr-эксилампы барьерного разряда для бактерицидных целей, были подобраны такие состав и давление рабочей смеси, которые обеспечивали соотношение интенсивностей излучения молекул KrBr*(207 нм)/Br₂*(291 нм) = 2,5/1 адекватное структуре спектра поглощения ДНК, с максимумами в диапазонах 200–220 и 240–290 нм.

На рис. 8 представлен результат инактивирующего воздействия УФ-излучения KrBr- и XeBr-эксилампы на *Staphylococcus aureus* при различных экспозициях.

Облучение микроорганизмов *Escherichia coli* и *Staphylococcus aureus* обоими лампами при различных экспозициях показало, что излучение KrBr-эксилампы инактивирует микроорганизмы эффективнее XeBr-эксилампы в 2,5–3 раза.

В шестой главе представлены экспериментальные результаты апробации модифицированной гафнием кварцевой поверхности ХеСІ-эксилампы барьерного разряда с максимумом излучения на 308 нм, сохраняющей спектральные характеристики излучения с $\lambda > 213$ нм [23*] и позволяющей снизить уровень образования озона. Предложены гипотезы образования озона на границе кварц/воздух, под воздействием УФ-излучения. Возможной причиной, по которой поверхность источника излучения под воздействием ультрафиолетового излучения инициирует формирование молекулы O_3 , является способность кварца адсорбировать молекулярный кислород. Чтобы уменьшить либо вовсе исключить инициацию поверхностью кварца образования O_3 , было предложено модифицировать кварцевую поверхность. Для этого на внешнюю поверхность излучателя специальным образом была нанесена пленка на основе диоксида гафния HfO_2 . Образовавшееся соединение диоксида гафния с кварцевой поверхностью известно как гафнон $HfSiO_4$. С одной стороны гафнон представляет собой материал химически неактивный и потому не взаимодействующий с O_2 , а с другой стороны пленка гафнона является сглаживающим микроскопические неоднородности кварцевой поверхности покрытием, предотвращающим адсорбцию кислорода.

Были изготовлены две одинаковые ХеСІ-эксилампы барьерного разряда: на поверхность одной из них (эксилампа 2) была нанесена пленка на основе диоксида гафния, а другая (эксилампа 1) оставлена без обработки. Спектр излучения эксиламп не менялся после нанесения на поверхность колбы пленки HfO_2 . На рис. 9 приведена схема экспериментальной установки для регистрации озона.

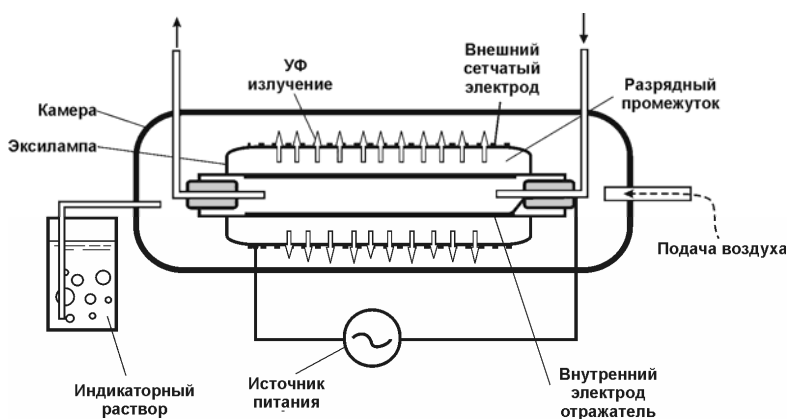


Рис. 9. Экспериментальная установка индикации озона

После того, как в лампе зажегся разряд, через камеру медленно прокачивался воздух. Далее воздух из камеры прокачивался через стандартный раствор крахмала с KI в дистиллированной воде, применяемый для индикации сильных окислителей [11*]. О концентрации озона можно было судить по степени превращения KI : $O_3 + 2KI + H_2O \rightarrow O_2 + 2KOH + I_2$ (1). Из уравнения

видно, что на одну молекулу озона O_3 приходится одна молекула йода I_2 . Затем выделившийся йод вступает в реакцию с крахмалом и происходит окрашивание раствора: $I_2 + \text{крахмал} \rightarrow \text{синее окрашивание}$. Интенсивность окраски зависит от количества высвободившегося в растворе I_2 и, соответственно, от растворенного в нем озона. Степень окрашивания раствора фиксировали при помощи спектрометра, потом оценивалось изменение оптической плотности растворов d (рис. 10).

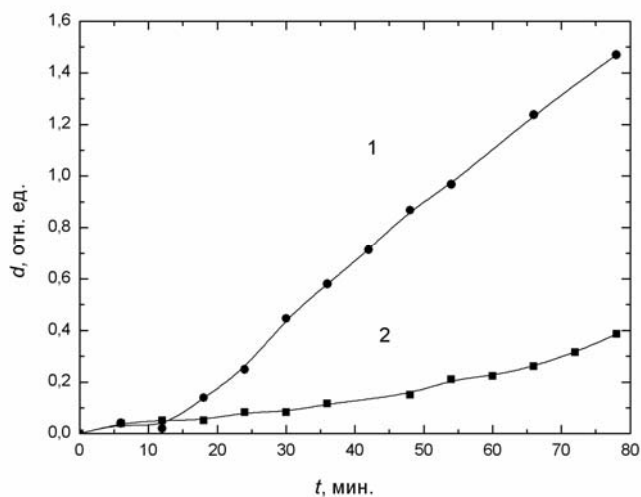


Рис. 10. Изменение оптической плотности растворов озонированных эксилампами 1 (1) и 2 (2), соответственно.

На этапе линейного изменения d (от 18 до 48 мин) возможно моделирование реакции (1) линейной зависимостью, для этого по экспериментальным точкам строилось уравнение линейной регрессии: $d = kt + c$ (k – характеризует скорость высвобождения йода в растворе; t – время протекания реакции; c – константа начальных условий). Поэтому сравнение величин k_1 (эксилампа 1) и k_2 (эксилампа 2) позволило оценить во сколько раз уровень озонирования воздуха эксилампой 1 больше, чем при использовании эксилампы 2. Для выбранных точек зависимости d строилась линейная регрессия, и рассчитывались коэффициенты k_1 и k_2 . В нашем случае $k_1 = 1,92 \times 10^{-2}$ (1/мин) и $k_2 = 3,2 \times 10^{-3}$ (1/мин), $R_1 = 0,99$ и $R_2 = 0,98$ (коэффициенты корреляции линейной регрессии), отношение $k_1/k_2 = 6$. Это означает, что в случае использования эксилампы 1 скорость продуцирования озона в 6 раз больше, чем в случае эксилампы 2 с модифицированной гафноном поверхностью.

Основные результаты настоящей работы состоят в следующем:

1. В широком диапазоне давлений инертный газ/ I_2 (от нескольких Торр до 1 атм) экспериментально исследованы спектральные и энергетические характеристики плазмы барьерного разряда. Установлено, что среди различных буферных газов (He, Ne, Ar, Kr) наиболее интенсивная люминесценция полосы $D' \rightarrow A'$ I_2^* (342 нм) реализуется в смесях с Ar и Kr. В смеси Kr- I_2 установлена зависимость между интенсивностями атомарной линии йода I^* (206,2 нм) и $D' \rightarrow A'$ полосы молекулярного йода I_2^* (342 нм) в спектре излучения Kr- I_2 плазмы барьерного разряда от общего давления газовой смеси.

2. Проведенное на основе экспериментальных данных моделирование кинетических процессов в плазме барьерного разряда на смеси Kr- I_2 показали, что эффективность образования $I_2^*(D')$ составляет $\sim 1\%$. Низкая эффективность образования молекул $I_2^*(D')$ объясняет причину низких эффективностей излучения в $D' \rightarrow A'$ полосе молекулярного йода I_2 -эксилампы.

3. Экспериментально исследованы оптические характеристики дигалогенов Cl_2^* (257,8 нм) и Br_2^* (291 нм) в смесях с аргоном, возбуждаемых барьерным разрядом. Установлены оптимальные парциальные давления и концентрации галогена в рабочей смеси, при которых реализуется максимальная мощность излучения $D' \rightarrow A'$ полос молекул Cl_2^* и Br_2^* .

4. Установлено, что в отличие от эксиплексных сред, возбуждаемых барьерным разрядом, в I_2 -, Cl_2 - и Br_2 -эксилампах наибольшая эффективность излучения реализуется в условиях однородного разряда без филаментов.

5. Экспериментально исследованы условия получения интенсивной люминесценции $A \rightarrow X$ полосы гидроксидов OH^* на смеси аргон/пары воды, в барьерном разряде. Созданная в результате исследований OH -лампа барьерного разряда с площадью излучающей поверхности и средней мощности излучения лампы составили 700 см^2 и 1,1 Вт, соответственно. Проведены ее первые ресурсные испытания – лампа проработала 60 ч в непрерывном режиме без заметного снижения средней мощности излучения.

6. Результаты непосредственного воздействия плазмы атмосферного давления на микроорганизмы, а также проведенные оценки потока химически активных частиц и УФ-фотонов показали, что ключевыми факторами стерилизующего действия плазмы являются ультрафиолетовое излучение с $\lambda < 230 \text{ нм}$ и электронейтральные химически активные частицы. Бактерицидная эффективность излучения с $200 < \lambda < 230 \text{ нм}$ обусловлена наличием в этой спектральной области главного максимума коэффициента поглощения ДНК.

7. Экспериментально установлено, что бактерицидное действие излучения KrBr-эксилампы на микроорганизмы почти в три раза больше, чем действие

ХеВr-эксилампы. Это связано с тем, что спектр излучения КгВr-эксилампы соответствует максимумам коэффициента поглощения ДНК.

8. На примере ХеСl-эксилампы барьерного разряда, показано, что модификация кварцевой поверхности на основе диоксида гафния HfO_2 с образованием гафнона приводит к снижению уровня озонирования в шесть раз по сравнению с аналогичной эксилампой, поверхность которой не подвергалась обработке. Предложенное покрытие не меняет энергетические и спектральные характеристики ХеСl-эксиламп. Предложены гипотезы, объясняющие образование озона в приповерхностном воздушном слое УФ-излучателя под действием излучения с $\lambda > 213$ нм.

Список цитируемой литературы:

- 1*. *Eliasson B., Kogelschatz U.* Modelling and applications of silent discharge plasmas // IEEE Transactions on plasma science. – 1991. – V.19. – No.2. – pp. 309–323.
- 2*. *Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Щитц Д.В., Ерофеев М.В.* Эксилампы – эффективные источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения // УФН. – 2003. – Т. 173. – № 2. – С. 201–217.
- 3*. *Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Эффективные газоразрядные источники спонтанного ультрафиолетового излучения: Физики процессов и экспериментальная техника. Эксилампы: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет, 1999. – 108 с.
- 4*. *Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Щитц Д.В., Скакун В.С., Ерофеев М.В., А.А. Лисенко.* Эксилампы барьерного и емкостного разрядов и их применение // ПТЭ. – 2006. – № 5. – С. 5–26.
- 5*. *Шевера В.С., Шуаибов А.К.* Исследование образования моногалогенидов инертных газов в поперечном электрическом разряде переменного тока // ЖТФ. – 1980. – Т. 50. – Вып. 4. – С. 728–736.
- 6*. *Gellert B., Kogelschatz U.* Generation of excimer emission in dielectric barrier discharges // Appl. Phys. B. – 1991. – 52. – pp. 14–21.
- 7*. *Волкова Г.А., Зверева Г.Н.* Исследование параметров барьерного разряда в смесях Кг- I_2 , Хе- I_2 // Оптика и спектроскопия. – 2004. – Т. 96. – № 3. – С. 419–427.
- 8*. *Morozov A., Krücken R., Ottenthal T., Ulrich A.* Ultraviolet emission from argon water-vapor mixtures excited with low-energy electron beams // Applied physics letters. – 2005. – V. 86. – pp. 011502-1–011502-3.
- 9*. *Солошенко А.И., Циолко В.В., Хомич В.А., Щедрин А.И., Рябцев А.В., Баженов В.Ю., Михно И.Л.* Применение тлеющего разряда для

- стерилизации медицинских изделий // Физика плазмы. – 2000. – Т.26. – №9. – С. 845–853.
- 10*. *Владимиров Ю.А., Потапенко А.Я.* Физико-химические основы фотобиологических процессов. – М.: Высш. Школа., 1989. – 214 с.
- 11*. *Кольтгоф И.М., Стенгер В.А.* Объемный анализ. – М.: Госхимиздат. –1952. – Т.2. – С. 337–427.
- 12*. *Шуаибов А.К., Грабовая И.А.* Электроразрядная ультрафиолетовая лампа на смеси ксенон/йод // Журнал прикладной спектроскопии. – 2005. – Т. 72. – № 2. – С. 247–250.
- 13*. *Шуаибов А.К., Грабова И.А.* Оптические характеристики электроразрядной плазмы низкой плотности на парах брома в ВУФ-УФ диапазоне спектра // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т. 101. – № 3. – С. 408–411.
- 14*. *Шуаибов А.К.* Оптические характеристики плазмы поперечного объемного разряда в Cl_2 и смеси He/Cl_2 // ЖТФ. – 2000. – Т. 70. – Вып. 10. – С. 117–119.
- 15*. *Василяк Л.М., Костюченко С.В., Красночуб А.В., Кудрявцев Н.Н., Куркин Г.А.* Экспериментальное исследование электродинамических и спектральных характеристик наносекундного импульсно-периодического разряда в хлоре // Теплофизика высоких температур. – 1995. – Т. 33. – № 6. – С. 826–832.
- 16*. *Möler T., Jordan B., Zimmerer G., Haaks D., Le Calve J., Castex M.-C.* Time and Spectrally Resolved Fluorescence of Cl_2 and ArCl^* in Cl_2 Doped Ar Under State Selective Pulsed Photoexcitation with Synchrotron Radiation // Z.Phys.D-Atoms, Molecules and Clusters. – 1986. – V.4. – pp. 73–87.
- 17*. *Lee L.C., Suto M.* Quantative VUV spectroscopy of Cl_2 // J. Chem. Phys. – 1986. – V. 84. – No. 10. – pp. 5277–5283.
- 18*. *Macdonald M., Donovan R.J., Gower M.C.* Oscillatory continuum emission from Br_2 following vacuum ultraviolet laser excitation // Chemical physics letters. – 1983. – V. 97. – No.1. – pp. 72–76.
- 19*. *Shuaibov A.K., Shimon L.L., Dashchenko A., Shevera I.* Electrodischarge VUV radiator of low pressure on the mixtures $\text{He}(\text{Ar}, \text{Kr}, \text{Xe})/\text{H}_2\text{O}$ // Proc. SPIE. – 2002. – V. 4747. – pp. 410–417.
- 20*. *Вуль А.Я., Кидалов С.В., Миленин В.М., Тимофеев Н.А., Ходорковский М.А.* Новый эффективный газоразрядный источник оптического излучения низкого давления на основе гидроксила OH // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – №. 1. – С. 10–16.
- 21*. *Morozov A., Krücken R., Ottenthal T., Ulrich A.* Ultraviolet emission from argon water-vapor mixtures excited with low-energy electron beams // Applied physics letters. – 2005. – V. 86. – pp. 011502-1–011502-3.

22*. *Fruth H.F.* Low voltage arcs in iodine // *Phys. Review.* –1928. –V.31. – p. 614–628.

23*. Физико-химические свойства окислов. Справочник / Под ред. Г. В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.

Основные материалы диссертации опубликованы в работах:

1. *Авдеев С.М., Соснин Э.А., Кузнецова Е.А.* Обработка плазмой атмосферного давления контаминированных *Escherichia coli* поверхностей // Сборник тезисов 11-й Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (24–31 марта 2005 г., г. Екатеринбург). – Екатеринбург: Изд-во АСФ России, 2005. – С.181–182.
2. *Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Кузнецова Е.А., Соснин Э.А.* Применение плазмы атмосферного давления для инактивации микроорганизмов, на примере *Escherichia coli*// Известия вузов. Физика. Приложение. (Материалы VI региональной конференции школы-семинара молодых ученых «Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития») – 2005. – Т.48. – №6. – С.107–109.
3. *Соснин Э.А., Авдеев С.М., Кузнецова Е.А.* Сравнение бактерицидных свойств излучения KrBr- и XeBr-эксилламп // Известия вузов. Физика. Приложение. (Материалы VI региональной конференции школы-семинара молодых ученых «Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития») – 2005. – Т.48. – №6. – С.145–147.
4. *Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Узкополосные источники ультрафиолетового излучения барьерного разряда на димерах моногалогенидов I_2^* , Cl_2^* // Сборник тезисов лекций и докладов X Международной школы-семинара «Люминесценция и лазерная физика» (2–6 октября 2006 г., г. Иркутск). – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2006. – С. 12–13.
5. *Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Оптические характеристики плазмы эксилламп барьерного разряда на димерах галогенов I_2^* , Cl_2^* , Br_2^* // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 103. – № 4. – С. 554–560.
6. *Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Излучение молекул йода I_2^* в барьерном разряде // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – № 1. – С. 107–110.
7. *Авдеев С.М., Зверева Г.Н., Соснин Э.А.* Исследование условий эффективной люминесценции $I_2^*(342 \text{ нм})$ в барьерном разряде в смеси Kr- I_2 // Оптика и спектроскопия. – 2007. – Т. 103. – № 6. – С. 420–432.
8. *Соснин Э.А., Ерофеев М.В., Авдеев С.М., Панченко А.Н., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В.* Ультрафиолетовая лампа

- барьерного разряда на молекулах ОН // Квантовая Электроника. – 2006. – Т. 36. – № 10. – С. 981–983.
9. *Соснин Э.А., Авдеев С.М., Кузнецова Е.А., Лаврентьева Л.В.* Бактерицидная KrBr-эксилампа барьерного разряда // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – №5. – С. 111–114 / *Sosnin E.A., Avdeev S.M., Kuznetsova E.A., Lavrent'eva L.V.* A bactericidal barrier-discharge KrBr-excilamp // Instruments and experimental techniques. – 2005. – V. 48. – № 5. – pp. 663–666.
 10. *Соснин Э.А., Авдеев С.М., Кузнецова Е.А., Суслов А.И., Лаврентьева Л.В., Ерофеев М.В.* Бактерицидное действие компонентов плазмы атмосферного давления на *Escherichia coli* // Прикладная физика. – 2005. – № 4. – С. 74–78.
 11. *Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Кузнецова Е.А., Соснин Э.А.* Применение плазмы атмосферного давления для инактивации микроорганизмов, на примере *Escherichia coli* // Известия вузов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 6. – С. 107–109.
 12. *Соснин Э.А., Лаврентьева Л.В., Тарасенко В.Ф., Авдеев С.М., Стоффелс – Адамович Е., Кузнецова Е.А.* Устройство для ультрафиолетовой инактивации микроорганизмов. // Патент RU 43458. Приоритет 27.09.2004. Рег. № заявки 2004128561/ 22 от 27.09.2004. Оpubл. 27.01.2005. Бюл. №3.
 13. *Соснин Э.А., Авдеев С.М., Кузнецова Е.А.* Сравнение бактерицидных свойств излучения KrBr- и ХеBr-эксилламп // Известия вузов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 6. – С. 145–147.
 14. *Sosnin Edward A., Kuznetsova Evgenia A., Avdeev Sergei M., et al.* A comparative study of atmospheric plasma and narrowband UV radiation effect on bacteria // Atomic and Molecular Pulsed Lasers VI (12-16 September 2005, Tomsk, Russia). Proceedings of SPIE. – 2006. – V. 6263. – pp. 626313-1–626313-11.
 15. *Авдеев С.М., Соснин Э.А., Чернов Е.Б., Тарасенко В.Ф.* ХеCl-эксилампа с пониженным уровнем озонирования // Оптика атмосферы и океана. – 2006. – Т. 19. – № 10. – С. 915–918.
 16. *Соснин Э.А., Авдеев С.М., Тарасенко В.Ф., Чернов Е.Б.* Снижение уровня озонирования эксилламп УФА и УФБ диапазонов // Сборник тезисов VI Международной светотехнической конференции: – Калининград, Светлогорск: 19–21 сентября 2006. – С.54.