

На правах рукописи



Киреев Сергей Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ
ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИМПУЛЬСНОГО КСЕНОНОВОГО ИСТОЧНИКА УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ**

Специальность 2.2.1. – «Вакуумная и плазменная электроника»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Фрязино – 2022

Работа выполнена в обществе с ограниченной ответственностью
«Научно-производственное предприятие «Мелитта»

Научный руководитель: **Шашковский Сергей Геннадьевич**
Кандидат технических наук, заместитель
генерального директора – главный конструктор ООО
«НПП «Мелитта»

**Официальные
оппоненты:** **Товстоног Валерий Алексеевич**
Доктор технических наук, старший научный
сотрудник, заместитель главного редактора журнала
«Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Ревазов Владислав Олегович
Кандидат технических наук, заместитель начальника
отдела Всероссийского научно-исследовательского
института автоматики им. Н. Л. Духова

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Рязанский государственный радиотехнический
университет имени В.Ф. Уткина»**, г. Рязань.

Защита состоится «02» июня 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного
совета 74.1.008.01 на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина» по адресу 141190,
Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а. Большой конференц - зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НПП «Исток» им.
Шокина» и на сайте www.istokmw.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 74.1.008.01
кандидат технических наук, доцент

Куликова И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современной плазменной электронике решение вопросов инициирования разряда является одним из приоритетных направлений исследований, так как процессы ионизации плазмообразующей среды определяют время готовности, эксплуатационные параметры, срок службы газоразрядных приборов. Сегодня особенно остро данная проблема встала в области оптико-электронных систем обеззараживания объектов (ОЭСО), в которых в качестве источника излучения в УФ-спектральном диапазоне применяется импульсный ксеноновый разряд, ограниченный кварцевой оболочкой (газоразрядная лампа). Сложность заключается в том, что существующие способы инициирования разряда (внешнее зажигание, последовательный пробой) из-за своей схемной и конструкторской реализации оказывают негативное влияние на формирование плазменного канала, а именно, приводят к смещению высокотемпературного разрядного столба к стенке, увеличивают временной интервал достижения квазистационарного состояния плазмы, способствуют потерям электрической мощности в элементах разрядного контура и т.д. В результате под воздействием указанных процессов происходит изменение прочностных и оптических свойств кварцевой оболочки (кристаллизация стекла, термоупругие напряжения, появление налетов и т.д.), снижение КПД излучения в УФ-области спектра, и как следствие уменьшение срока службы импульсной лампы. При этом, для увеличения КПД излучения в УФ-области необходимо повышать скорость ввода электрической энергии разряда, что приводит к усилению негативного воздействия указанных процессов.

Вопросы влияния способа инициирования разряда на электрические параметры и характеристики излучения импульсной ксеноновой газоразрядной лампы описаны в незначительном количестве научных работ. При этом большинство выполненных исследований посвящено изучению влияния механизмов развития разряда на КПД излучения в видимом или ближнем инфракрасном диапазонах. До настоящего времени за решение задач, направленных на выявление связи энергетических характеристик излучения в спектральном диапазоне 200-300 нм со способом формирования плазменного канала, научные специалисты не брались в силу двух причин. Во-первых, отсутствовала потребность в источниках УФ-излучения в спектральном диапазоне 200-300 нм мощностью 200 Вт и выше. Во-вторых, использование в качестве материала оболочки оптически прозрачного кварца приводило к возникновению обратимой непрозрачности с запиранием части УФ-излучения или к быстрому выходу из строя газоразрядной лампы по причине взрыва или снижения излучательных характеристик.

В итоге, разработка новых конструктивных решений ксеноновой газоразрядной лампы во взаимосвязи с технической реализацией перспективных способов инициирования разряда, направленных на повышение КПД и срока службы импульсного источника УФ-излучения в спектральном диапазоне 200-300 нм, является, несомненно, **актуальной и практически значимой задачей.**

Целью диссертационной работы является повышение КПД излучения и срока службы импульсных газоразрядных ксеноновых ламп в спектральном диапазоне 200-300 нм для оптико-электронных систем обеззараживания

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

1. Провести научно-технический анализ современных способов инициирования импульсных разрядов в инертных газах и выявить теоретические предпосылки повышения эксплуатационных характеристик, определить новые конструктивные и

схемные технические решения, направленные на повышение КПД и срока службы импульсных ксеноновых газоразрядных ламп.

2. Разработать универсальные источники питания и методики спектрально-энергетических измерений ультрафиолетового излучения и создать аппаратно-программный измерительный комплекс для исследования электрических параметров импульсных газоразрядных ламп и радиационных характеристик в диапазоне длин волн 200-300 нм.

3. Провести экспериментальные исследования влияния различных способов инициирования разряда и параметров разрядного контура с целью получения максимальных КПД и срока службы импульсных ксеноновых газоразрядных ламп высокой яркости с цилиндрической и шаровой формами оболочек.

4. Провести конструкторские работы, направленные на увеличение КПД излучения и срока службы импульсных газоразрядных ламп в УФ-области спектра.

5. Разработать рекомендации по реализации разработанных научно-технических решений в серийно выпускаемых изделиях и провести испытания импульсных ксеноновых ламп в составе оптико-электронных систем обеззараживания воздуха и поверхностей. Определить влияние разработанных научно-технических решений на биоцидную эффективность ОЭСО в целом.

Научная новизна заключается в том, что впервые для импульсных ксеноновых ламп:

1. Установлена азимутальная неравномерность процессов деградации внутренней поверхности разрядной трубки, обусловленная пристеночным формированием плазменного канала при последовательном способе инициирования разряда, приводящая к снижению срока службы в спектральном диапазоне 200-300 нм.

2. Разработан способ осесимметричного инициирования импульсного плазменного канала, основанный на формировании сильноточной стадии разряда из контрагированного слаботочного вспомогательного разряда постоянного тока, который в отличие от последовательного и внешнего способов инициирования разряда позволил снизить процессы эрозии кварцевой оболочки в течение срока службы импульсного источника УФ-излучения.

3. Создана методика измерения характеристик излучения, построенная на совместной регистрации спектральных и энергетических характеристик импульсного ксенонового разряда и позволяющая ликвидировать имеющийся пробел в метрологии излучения в узком диапазоне длин волн 200-300 нм.

4. Разработана конструкция импульсного источника УФ-излучения с размещением в разрядном объеме дополнительной оболочки из сапфира, обладающей большей термической и химической стойкостью, чем у кварца, что обеспечило рост КПД в спектральном диапазоне 200-300 нм до 15 % за счет снижения кристаллизации колбы и эффекта оптического запираания УФ-излучения.

5. Предложенный принцип инициирования разряда, основанный на введении дополнительного электрода в межэлектродный промежуток, что за счет снижения омических потерь и индуктивности разрядного контура позволило повысить энерговыход в плазменную дугу неограниченного свободно расширяющегося разряда до 90 %.

Научная и практическая значимость работы.

Научная ценность состоит в том, что комплекс представленных результатов, научных положений и выводов диссертационной работы, полученных при исследовании механизмов иницирования разряда, способов повышения КПД и срока службы источников излучения, способствует выявлению новых знаний в области газового разряда и служит базой для проектирования других типов газоразрядных источников некогерентного излучения в широком оптическом диапазоне, предназначенных для использования в различных областях плазменной электроники, квантовой электроники и светотехнике.

Практическую значимость представляют собой:

1. Способ осесимметричного иницирования плазменного канала, позволяющий при пиковой объемной электрической мощности 210 кВт/см^3 увеличить излучательную наработку импульсной трубчатой ксеноновой лампы в спектральном диапазоне 200-300 нм более чем в 10 раз в сравнении с лучшими серийно выпускаемыми образцами газоразрядных источников УФ-излучения данного класса.

2. Разработанные технические решения, которые при осесимметричном иницировании разряда и пиковой объемной электрической мощности 400 кВт/см^3 позволили увеличить срок службы импульсной ксеноновой газоразрядной лампы более чем в 50 раз до 36 млн. импульсов.

3. Результаты исследований по повышению эффективности УФ-излучения ксенонового разряда за счет снижения диаметра плазменного канала до 3 мм, обеспечившие при пиковой объемной электрической мощности 770 кВт/см^3 КПД излучения в спектральном диапазоне 200-300 нм равный 12 % при сроке службы 246 млн. импульсов.

4. Новый принцип повышения эксплуатационных характеристик источника УФ-излучения посредством применения в конструкции импульсной газоразрядной лампы системы из сапфировой и кварцевой оболочек, ограничивающих ксеноновый разряд, что позволило при пиковой объемной электрической мощности $1,3 \text{ МВт/см}^3$ достичь КПД излучения 15 % в спектральном диапазоне 200-300 нм.

5. Результаты исследований, показавшие, что введение в разрядный промежуток короткодуговой ксеноновой лампы с межэлектродным промежутком 6 мм и давлением наполнения 6,5 атм электрода поджига позволяет достичь КПД излучения 5,4 % в спектральном диапазоне 250-290 нм при заряде рабочей емкости 2 мкФ до напряжения 1 кВ.

Практическая полученных в диссертации подтверждается актами внедрения результатов работы в производстве импульсных УФ-установок ООО «НПП «Мелитта» (г. Москва), научно-производственного центра «Лазеры и аппаратура ТМ» (г. Москва, Зеленоград), ОКБ «Булат» (г. Москва, Зеленоград).

Методология и методы исследования. В работе использован комплексный подход к проведению исследований, включающий физические эксперименты и анализ полученных результатов, аналитические расчеты, построение качественных моделей и выполнение на их основе численного моделирования параметров газоразрядной лампы, исследование экспериментальных образцов на разработанном аппаратно-программном измерительном комплексе. Для изучения электрических характеристик газового разряда применялся калиброванный коаксиальный шунт SDN-001, компенсированный делитель напряжения Pintek HVP-39Pro с наносекундным временным разрешением. При исследовании спектрально-энергетических

характеристик излучения использовались спектрометр AvaSpec-ULS2048-USB2, совмещенный с фотодиодом SGlux SG01D-C18, и пироэлектрический приемник излучения Ophir PE50BB-DIF. Все измерительные приборы, применяемые в экспериментах, прошли аттестацию в установленном порядке. Некоторые результаты исследований получены по методикам и на экспериментальной базе научно-исследовательских институтов АО «НИИ «Элпа», АО «НИИ «ЗЕНИТ», ОАО «СКТБ «Ксенон», при непосредственном участии автора диссертации. Испытания газоразрядных ламп в составе ОЭСО выполнялись в аккредитованных НИИ с использованием стандартизированных методик оценки биоцидной эффективности.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Показано, что при осесимметричном способе инициирования импульсного дугового разряда в ксеноне и пиковой объемной электрической мощности 400 кВт/см^3 срок службы импульсной газоразрядной лампы составил 36 млн. импульсов при КПД излучения 8,4 % в спектральном диапазоне 200-300 нм.

2. Выявлено, что при снижении диаметра ксенонового плазменного канала до 3 мм и увеличении пиковой объемной мощности до 770 кВт/см^3 срок службы достигает 246 млн импульсов при КПД излучения 12 % в спектральном диапазоне 200-300 нм.

3. Установлено, что использование системы из сапфировой и кварцевой оболочек позволяет поднять пиковую объемную электрическую мощность импульсного дугового разряда до $1,3 \text{ МВт/см}^3$ и достигнуть КПД излучения 15 % в спектральном диапазоне 200-300 нм.

4. Выявлено, что введение в разрядный промежуток короткодуговой импульсной газоразрядной лампы электрода зажигания за счет снижения активно-индуктивных потерь в разрядном контуре позволило достичь уровня энерговклада в плазму 92 % и КПД излучения в спектральном диапазоне 250-290 нм – 5,4 %.

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- систематическим характером экспериментальных исследований на аттестованном оборудовании с использованием современных высокоточных средств измерений, калиброванных в аккредитованных поверительных центрах;
- применением современных компьютеризированных методов;
- хорошим совпадением полученных различными методами экспериментальных данных и удовлетворительным их согласованием с расчетно-аналитическими моделями, как в качественном, так и в количественном отношении;
- воспроизводимостью полученных на экспериментальном аппаратно-программном измерительном комплексе параметров импульсной ксеноновой лампы с результатами исследований в составе ОЭСО в различных аккредитованных центрах по определению биоцидной эффективности изделий;
- удовлетворительным совпадением полученных результатов с экспериментальными данными других исследователей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях.

Личный вклад автора заключается в:

- постановке задач, теоретической трактовке результатов исследований, обобщении полученных экспериментальных и расчетных данных, выработке выводов по проделанной работе, формулировании научных положений, выносимых на защиту;

- разработке стендового оборудования, методик измерения спектрально-энергетических и электротехнических характеристик импульсных источников УФ-излучения и способов калибровки применяемых фотоэлектрических приемников;
- непосредственном участии в экспериментальных исследованиях энергоэффективных, радиационных характеристик импульсных газоразрядных ламп и ресурсных испытаниях в составе ОЭСО.
- непосредственном участии в разработке конструкции импульсной ксеноновой лампы с двойной оболочкой.
- в разработке модели расчета параметров импульсных ксеноновых ламп для ОЭСО.

Фамилии соавторов, принимавших участие в отдельных направлениях исследований, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях: VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2022, XI Международной конференции по фотонике и информационной оптике, 14th international conference on «Gas discharge plasmas and their applications» (Tomsk, 2019), XVI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (г. Томск, 2020 г.), Научно-практическая конференция «Физико-технические интеллектуальные системы ФТИС-2022» (Москва, 2022), 11 Международная научно-практическая конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий МТО-603» (Курск, 2021), 17 международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления (Г. Томск, 2021), Международная конференция «Инженерные исследования-2021» (Москва, 2021), IX международный симпозиум по радиационной плазмодинамике (г. Звенигород, 2012 г.), 8th international workshop and summer school on plasma physics (г. Китен, Болгария, 2018 г.), Международная конференция «2019 IUVA World Congress» (г. Сидней, Австралия, 2019 г.), The Seventh Moscow Solar System Symposium (г. Москва, 2016) на 14 научных семинарах и совещаниях в МГТУ им. Н.Э. Баумана, НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ», ОКБ «Булат», АО «СКБ «ЗЕНИТ», АО СКТБ «Ксенон», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 193 страницах текста, содержит 89 рисунков и 8 таблиц. Список литературы насчитывает 157 наименований.

Содержание диссертационного исследования

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель, научная новизна, выносимые на защиту положения, описана практическая и теоретическая значимости работы.

В первой главе диссертационного исследования выполнен анализ моделей, описывающих формирование плазменного канала на его слаботочной и сильноточной стадиях, а также изучены физико-химические процессы, протекающие на электродах и поверхности кварцевой оболочки. Проведен научный анализ публикаций отечественных и зарубежных исследователей, посвященных изучению существующих способов инициализации разряда, а именно, последовательному, параллельному

поджигу, использованию внешних электродов для зажигания разряда и т.д. Показаны преимущества и выявлены недостатки каждого из способов формирования плазменного канала в газоразрядной лампе. Определены параметры, влияющие на эффективность преобразования электрической энергии в излучательную в УФ-диапазоне спектра и на срок службы. В результате анализа разработана единая схема, отображающая совокупность параметров, определяющих КПД излучения и срок службы газоразрядной лампы (Рисунок 1).

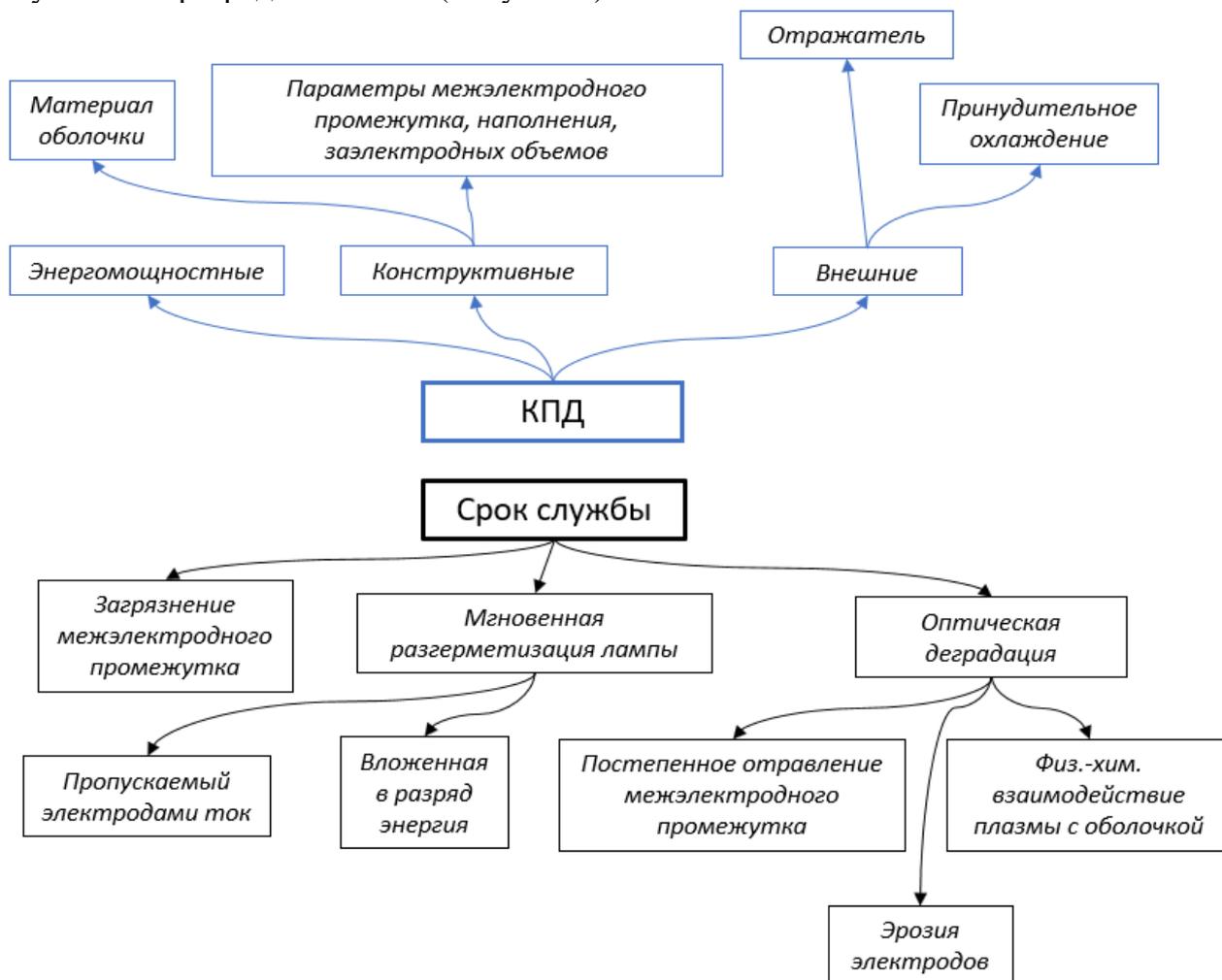


Рисунок 1 – Принципиальная схема параметров, оказывающих влияние на срок службы и КПД импульсных газоразрядных ламп

В главе 2 разработана расчетно-теоретическая модель, которая исходя из эксплуатационных характеристик проточных систем фотохимического и фотобиологического воздействия, позволила сформулировать требования к газоразрядной лампе. Для описания энергетической экспозиции E всех точек движущегося в реакторе воздушного поршня, толщина которого определяется как отношение скорости потока воздуха к частоте вспышек УФ-излучения, предложено следующее уравнение:

$$E(x, y, z, \lambda) = \sum_{i=0}^N \left(E_m(x, y, z + ih, \lambda) \times k(x, y, \frac{H}{2} - ih, \lambda) \right) \quad (1)$$

где x, y, z координаты газоразрядной лампы в пространстве рассматриваемого объема обеззараживания; H – длина реактора. Данное математическое выражение дополнено

системой уравнений, описывающих характеристики плазменного канала в совокупности с параметрами электрического питания лампы:

$$l(L, C) = \left(\frac{570}{T_{bb}}\right)^4 \times \frac{W \cdot k_c}{\pi d \times \tau(L, C)} \quad (2)$$

$$\tau(L, C) = \sqrt{L \times C / 0.3} \quad (3)$$

$$K_0(L, C) = 1.27 \left(\frac{l(L, C)}{d}\right) \times (P_0 / 450)^{0.2} \quad (4)$$

$$Z_0(L, C) = \sqrt{L / C} \quad (5)$$

$$\gamma = R_{\Sigma}(L, C) / 2Z_0(L, C) \quad (6)$$

$$R_{\Sigma}(L, C) \approx 0.3Z_0 + 1.28 \times K_0(L, C)^2 / U_0(C) \quad (7)$$

$$U_0(C) = \sqrt{2W / C} \quad (8)$$

В результате реализации предложенной расчетной модели получена расчетная зависимость межэлектродного расстояния от величины емкости накопительного конденсатора при следующих параметрах: яркостная температура 8 кК, внутренний диаметр лампы 5 мм, давление наполнения ксеноном 220 Торр, энергия разряда 53 Дж и КПД излучения в спектральном диапазоне 200-300 нм равном 10 %. Расчеты показали целесообразность использования в дальнейших исследованиях межэлектродного расстояния газоразрядной лампы – 120 мм при работе с емкостью накопительного конденсатора – 60 мкФ.

Для реализации поставленной в диссертации цели возникла необходимость в создании комплекса испытательного оборудования (Рисунок 2), который структурно состоял из систем фотометрии импульсного УФ-излучения, регистрации электрических параметров импульсного разряда и электрического питания газоразрядной лампы, позволяющего варьировать:

- индуктивность в диапазоне от 7 до 53 мкГн;
- активное сопротивление контура в интервале от 22 до 138 мОм;
- рабочую емкость в диапазоне от 10 до 120 мкФ;
- тип инициирования разряда.

В силу отсутствия в России методик и аппаратуры для регистрации энергетических характеристик импульса УФ-излучения в узком спектральном диапазоне 200-300 нм, был разработан метод измерений, построенный на одновременной регистрации импульса излучения фотодиодным приемником излучения SG01D-C18 и оптоволоконным спектрометром с высокой чувствительностью в УФ-диапазоне AvaSpec-ULS2048-USB2.

Математические преобразования совмещенных выходных сигналов позволили вывести коэффициент пропорциональности для зарегистрированного спектра:

$$K_{\text{спек}} = \frac{U_f \cdot \tau}{S_{\text{max}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\text{спек}}(\lambda) \cdot S(\lambda) d\lambda} \quad (9)$$

где $K_{спек}$ – коэффициент пропорциональности реакции спектрометра, Дж/отн.ед.; $E_{спек}(\lambda)$ – реакция спектрометра на приходящее спектральное распределение энергетической освещенности, отн.ед/(м²·нм); $S(\lambda)$ – нормированная на максимальное значение спектральная чувствительность фотоприемника.

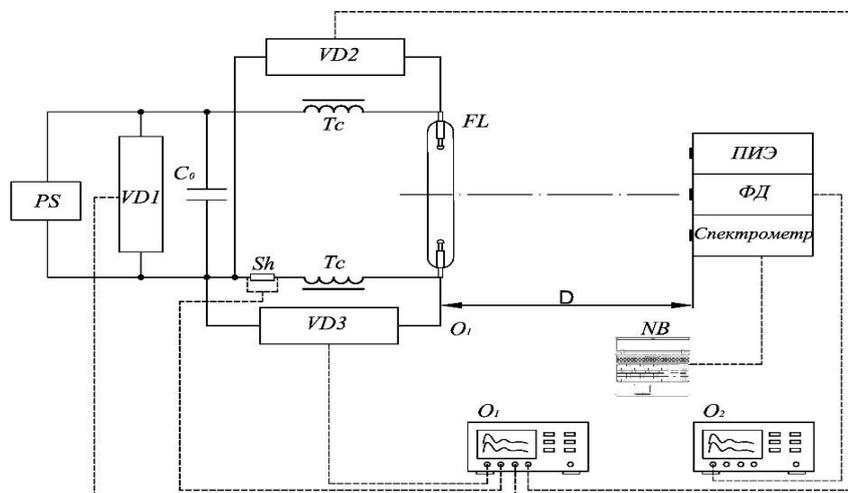


Рисунок 2 – Принципиальная схема измерительного стенда

PS – зарядный блок; VD1, VD2, VD3 – делители напряжения; C_0 – рабочий конденсатор; Sh – безындуктивный шунт; T_c – катушка поджига; FL – импульсная газоразрядная лампа; O_1 , O_2 – осциллографы; NB – ноутбук; ПИЭ – пьезоэлектрический измеритель энергии; ФД – фотодиодный приемник излучения; D – расстояние от исследуемой импульсной газоразрядной лампы до фотоприемного устройства.

В главе подробно рассмотрены разработанные методики градуировки фотоприемных устройств и расчетов энергетической облученности УФ-излучением импульсной ксеноновой газоразрядной лампы.

В заключительной части главы сформулированы основные направления расчетных и экспериментальных исследований, направленные на реализацию поставленной цели.

В главе 3 рассмотрены результаты исследований, которые проводились в несколько этапов. На первом этапе изучен механизм деградации кварцевой оболочки под воздействием высокотемпературного плазменного канала, формируемого при последовательном зажигании газоразрядной лампы. В данном случае инициирование разряда происходит путем подачи разнополярного кратковременного высоковольтного импульса напряжения (15-20 кВ) на оба электрода от последовательно присоединенной к ним вторичной обмотки высоковольтного трансформатора.

В результате проведенных исследований выявлено, что в процессе наработки газоразрядной лампы (600 тыс. имп.) наблюдается уменьшение до 50% энергии излучения в УФ-С области спектра. При этом установлено, что в различных интервалах длин волн снижение эффективности импульсной лампы различно. Так, энергия излучения в спектральном диапазоне 200-230 нм снижается на 50 % за \approx 200 тыс. импульсов, а в диапазоне 200-400 нм данное явление наблюдается после 1 млн. импульсов (Рисунок 3). Полученная зависимость позволяет констатировать факт, что процесс снижения характеристик излучения газоразрядной лампы в УФ-

области спектра связан с изменением оптических свойств оболочки, ограничивающей плазменный канал.

В ходе дальнейших исследований выявлена повышенная скорость деградации части оболочки (формирование налетов, кристаллизация и т.д.), обращенной к поверхности испытательной установки. Было установлено, что данное явление связано с влиянием на механизм инициирования разряда заземленной поверхности установки, расположенной с одной стороны лампы. При пробое газового промежутка лампы стример формируется вдоль внутренней поверхности разрядной трубки в указанной зоне, в который впоследствии вкладывается запасаемая в конденсаторе энергия (Рисунок 4).

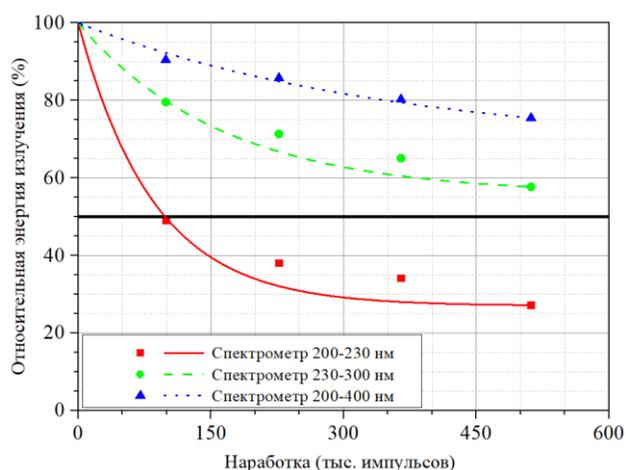


Рисунок 3 – Снижение относительной энергии излучения в различных спектральных диапазонах с наработкой лампы

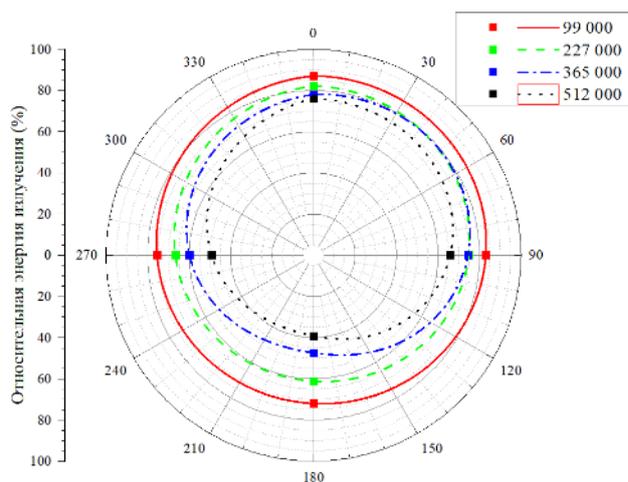


Рисунок 4 – Азимутальное снижение энергии излучения с наработкой. 180° – нижняя часть лампы

Для устранения выявленного недостатка в работе предложен способ осесимметричной организации разряда, заключающийся в поддержании слаботочного низкотемпературного плазменного канала в промежутке между силовыми импульсами тока. В результате после зажигания вспомогательного разряда форсированная термическая ионизация газового промежутка происходит, не вдоль стенки разрядной трубки, как это наблюдалось нами в случае последовательного поджига, а по оси предварительно сформированного плазменного столба. Схемная реализация предложенного технического решения показана на блок-схеме рисунка 5.

Ресурсные испытания (Рисунок 6) подтвердили правомочность сделанных предположений об эффективности предложенного технического решения применения вспомогательного инициирующего разряда. В диссертации показано, что через 1 млн. импульсов снижение энергии излучения в спектральном диапазоне 200-300 нм лампы, работающей в контуре с инициированием разряда по поверхности, составило $\approx 62\%$, тогда как для лампы в контуре с осесимметричным инициированием только 10% . Снижение энергии излучения в контуре с осесимметричным инициированием разряда составило около 42% через 6.4 млн. импульсов.

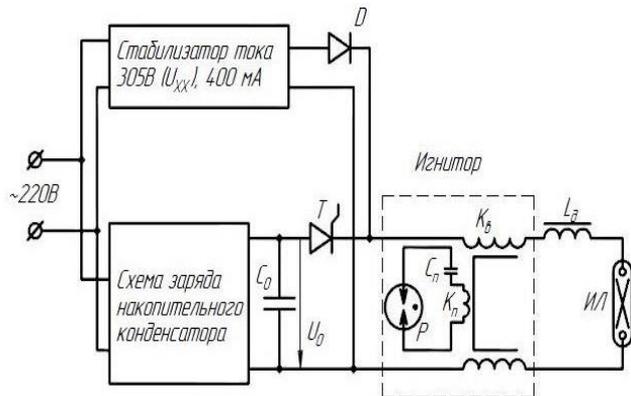


Рисунок 5 – Схема иницирования разряда с дежурной дугой

ИЛ – импульсная лампа; C_0 – накопительный конденсатор; $C_{п}$ – конденсатор поджига; $K_{п}$ – первичная обмотка катушки поджига; $K_{в}$ – вторичная обмотка катушки поджига; L_D – дроссель; R – резистор ограничения заряда конденсатора поджига; P – разрядник; T – силовый тиристорный ключ; D – диод

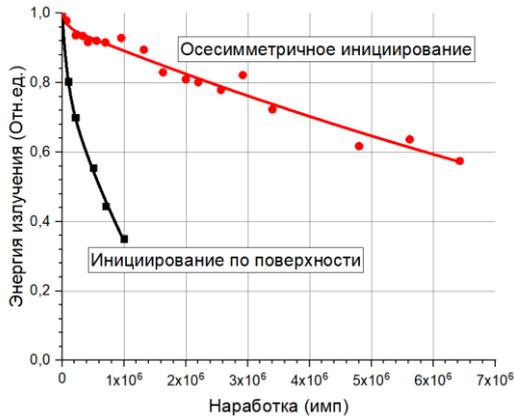


Рисунок 6 – Ресурсные испытания лампы типа ИНП-5/120 в контурах с дежурной дугой () и без ()

Снижение индуктивности и сопротивления контура позволило поднять спектральный КПД излучения и срок службы до 30 млн. импульсов (Рисунок 7). В результате дальнейшей оптимизации разрядного контура с источником вспомогательного разряда достигнуты следующие параметры: вкладываемая в плазму энергия $W_{л} \approx 56$ Дж, что составляет $\approx 89\%$ от запасенной в конденсатор; КПД в бактерицидной области составил $8,4\%$; характерное время энерговклада составило 61 мкс. Данный результат свидетельствует о хорошем согласовании контура с лампой при низком значении паразитного сопротивления.

В заключительной части главы приводятся расчетно-экспериментальные результаты исследований по оптимизации предложенного разрядного контура с использованием вспомогательного разряда.

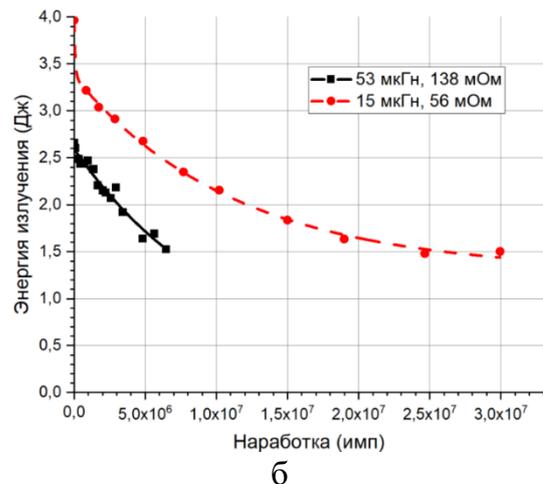
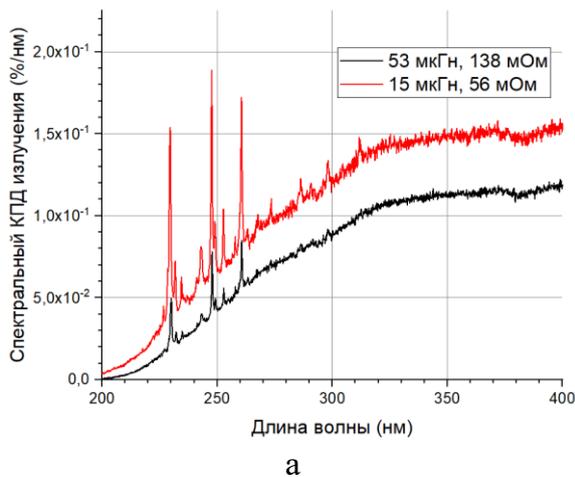


Рисунок 7 – Спектральный КПД излучения импульсной ксеноновой лампы (а) и срок службы (б) с дежурной дугой при различных индуктивности и сопротивлении контура

Подробно рассмотрено влияние на спектрально-энергетические характеристики излучения ксенонового плазменного канала и срока службы газоразрядной лампы величины емкости и напряжения заряда накопительного конденсатора, частоты вспышек, индуктивности и сопротивления разрядного контура.

В результате большого объема проведенных исследований установлено, что за КПД излучения ксеноновой плазмы в УФ-части спектра отвечает пиковая объемная плотность мощности, зависимость которых определяется выражением:

$$\eta_{200-300} \approx 2.91 + 1,38 \cdot 10^{-2} \cdot P_{cp} \quad (10)$$

В четвертой главе рассматриваются результаты конструкторских исследований, направленных на повышение срока службы импульсной ксеноновой газоразрядной лампы за счет снижения деградиционных процессов разрядной трубки. Как установлено в главе 2, увеличение срока службы происходит при снижении удельной нагрузки на оболочку и времени энерговыклада в разряд. Для этой цели была разработана конструкция лампы с межэлектродным расстоянием 80 мм, у которой рабочий объем представляет собой трубку диаметром 5 мм с установленными герметично электродами, сужаемую в разрядной части до 3 мм. Лампа испытывалась в разрядном контуре с емкостью 10 мкФ при напряжении 1,4 кВ и частоте вспышек 20 Гц (режим 9). Индуктивность и сопротивление разрядного контура составляли 7 мкГн и 22 мОм соответственно.

Как видно из полученных результатов, высокие удельные пиковые (Рисунок 8) мощностные характеристики предполагают большую нагрузку на внутреннюю поверхность стенки лампы, в то же время за счет короткой длительности импульса энергетическая нагрузка минимальная среди всех рассмотренных режимов.

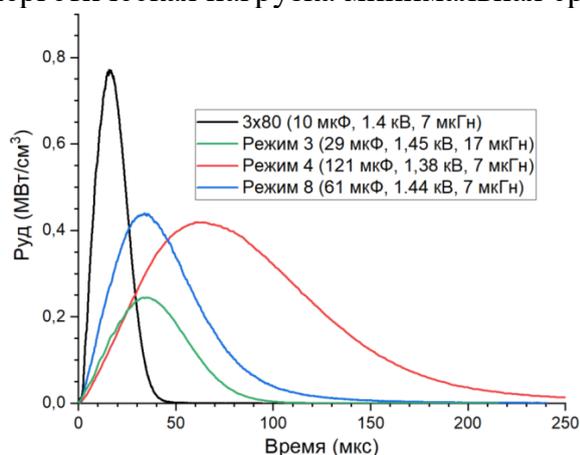


Рисунок 8 – Временная зависимость пиковой объемной электрической мощности

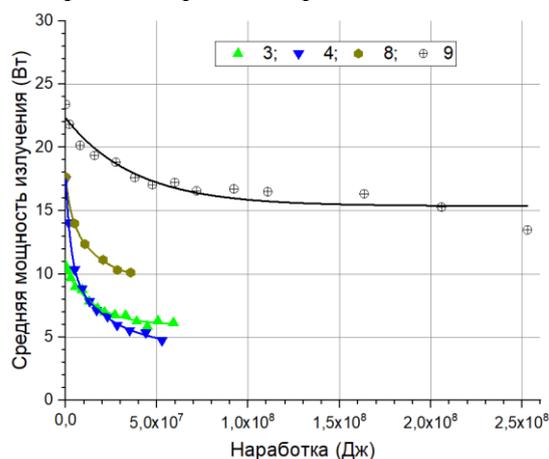


Рисунок 9 – Динамика снижения энергии излучения с наработкой в различных разрядных контурах (номера разрядных контуров 3-9 соответствуют номерам в приведенной в диссертации таблицы)

Исследование оптической деградации лампы показало, что выбранный режим для лампы 3x80 значительно превосходит все предыдущие как по суммарной энергетической наработке, так и по относительному снижению энергии излучения (Рисунок 9). Стабилизация излучательных параметров ламп происходит на уровне

71 % от первоначального значения, тогда как для режимов 3 и 8 стабилизация начинается с уровня $\approx 60\%$. Визуальный осмотр лампы показал, что эрозионные частицы концентрируются в приэлектродных областях. Предположительно выбранное конструктивное решение сужения разрядной части послужило «ловушкой» для эрозионных частиц, которые при предионизации в момент формирования плазменного канала уносятся с поверхности электрода ударной волной в диагональном направлении от электрода. В предложенном техническом решении отсутствие в разрядной части лампы желто-коричневого налета, активно поглощающего УФ-излучение, связывается с высокой тепловой нагрузкой на кварц, при которой происходит термический отжиг образующихся центров окраски.

Исходя из того, что деградация оболочек современных газоразрядных ламп связана с химическими свойствами кварцевого стекла, представляется перспективным решением ограничить разряд колбой из более термостойкого материала, например, сапфира. Экспериментальная кварцево-сапфировая лампа представляет собой кварцевую оболочку 2 с размещенной в газоразрядной части сапфировой трубкой 1 с внутренним диаметром 5 мм. Электродные узлы выполнены по технологии фольговых тоководов и включают в себя электрод 3, кварцевый вкладыш 4 и электродный вывод 5 (Рисунок 10). Такое решение позволило исключить возможность контакта плазменного канала с кварцевой стенкой лампы. Длина межэлектродного промежутка составила 110 мм. Емкость рабочего конденсатора составляла 40 мкФ при напряжении заряда 2,42 кВ.

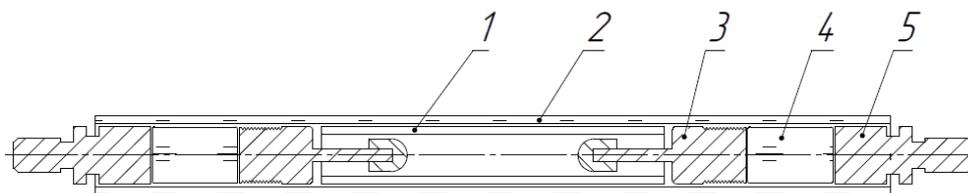


Рисунок 10 – Принципиальная схема конструкции кварцево-сапфировой лампы

Рассмотренный контур позволил к 29 мкс достигнуть пиковой мощности около 2,8 МВт. Такие характеристики импульса мощности обеспечили яркостную температуру в спектральном диапазоне 237-267 нм около 11 кК, что сдвинуло максимум спектра излучения в коротковолновую УФ-область и подняло КПД излучения в бактерицидном диапазоне до 16,8 %.

Заключительная часть главы посвящена исследованию инициализации разряда посредством введения в разрядный промежуток вспомогательного электрода зажигания. В качестве объекта исследований выбран короткодуговой источник УФ-излучения на основе импульсного ксенонового разряда высокого давления.

До сегодняшнего дня не решен вопрос о типе эмиссии электронов (термоэмиссионная, взрывная) с электродов импульсной лампы, но установлен факт блуждающего катодного пятна при прохождении импульса тока. Поэтому вопрос стабильной инициализации разряда является несомненно актуальным.

За счет введения электрода поджига в плазменный канал удалось вынести систему инициирования из разрядного контура, что позволило достичь эффективности энерговыклада энергии в плазму $\approx 90\%$.

В главе изложены результаты исследования радиационных характеристик ламп с межэлектродными расстояниями 4 и 6 мм, наполненных до давления 4 и 6,5 атм соответственно. Принципиальная схема разрядного и иницирующего контуров приведена на рисунке 11. В работе получены зависимости яркостных температур в

диапазоне от 12 до 30 кК от вкладываемой энергии. Эффективность преобразования запасаемой энергии в излучательной составила не более 50 % (Рисунок 13), около 60 % из которой приходится на УФ-часть спектра.

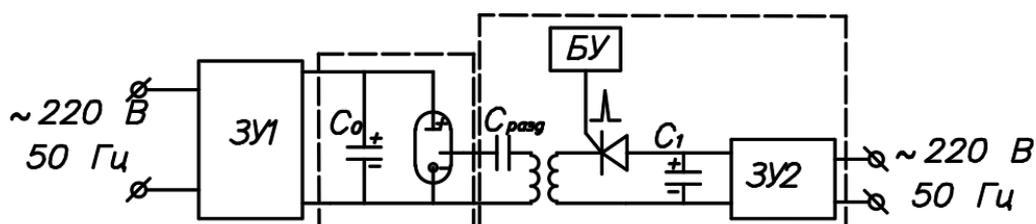


Рисунок 11 – Принципиальная схема разрядного контура и контура иницирования короткодуговой трехэлектродной лампы

ЗУ1 и ЗУ2 – зарядные устройства разрядного контура и контура иницирования соответственно; БУ – блок управления контуром иницирования; C_0 , C_1 – накопительные емкости разрядного контура и контура иницирования; $C_{разд}$ – разделительный конденсатор

Несмотря на относительно высокие значения КПД излучения в бактерицидном диапазоне спектра фотография тела свечения (Рисунок 12) показала, что плазменный канал «привязывается» к поджигному электроду и имеет изогнутую форму. Электрод поджига при таком разряде подвергается воздействию мощных радиационных и тепловых потоков, что приводит к его деградации. Вероятно, срок службы такой лампы будет ограничена скоростью распыления поджигного электрода.

В исследованных режимах (длительности фронта нарастания тока $\leq 1,5$ мкс, запасаемые электрические энергии $W_0 = 2-9$ Дж) предельная для ксенона яркостная температура в видимом диапазоне ~ 30 кК достигается при зарядном напряжении $U_0 = 2$ кВ ($I_{max} \sim 3.5$ кА, $W_0 = 4$ Дж). Светоотдача лампы практически не зависит от электрической энергии разряда и в исследованном диапазоне запасаемых энергий составляет ~ 15 лм·с/Дж; сила света увеличивается с ростом энерговклада в разряд и при $W_0 = 9$ Дж достигает 2 Мкд.

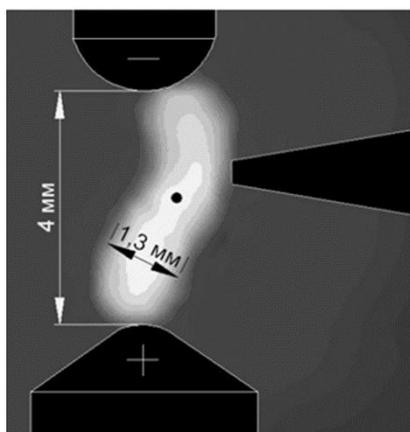


Рисунок 12 – Тело свечения шаровой трехэлектродной лампы. В центре разрядного канала показано изображение проекции апертурной диафрагмы в масштабе

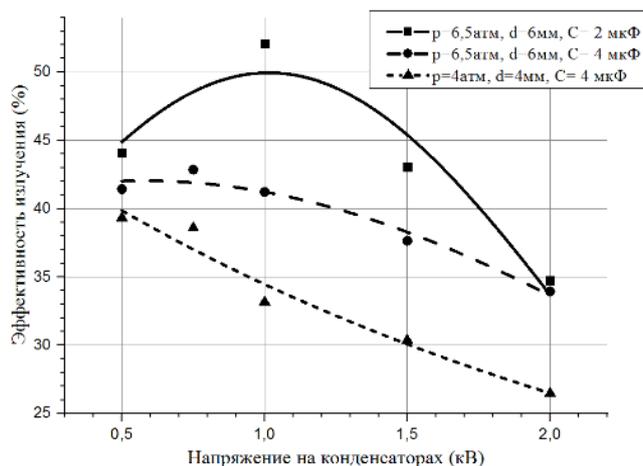


Рисунок 13 – Зависимость интегральной по спектру эффективности излучения от напряжения на конденсаторе

Излучение лампы характеризуется высоким относительным выходом УФ компоненты спектра – 50-60 % по энергии и излучаемой мощности. Спектральные плотности потоков излучения в коротковолновом УФ-диапазоне соответствуют яркостным температурам 22-24 кК.

В данном классе источников излучения с плазменным столбом, ограниченном электродами, срок службы определяется эрозией катода и анода. В главе приведены результаты исследований, посвященные изучению последствий распыления электродов (изменение теплового поля колбы, изменение спектрально-энергетических характеристик и индикатрисы излучения).

Полученные результаты позволяют рассматривать разработанную импульсную трехэлектродную ксеноновую лампу как перспективный широкополосный источник излучения высокой спектральной яркости для многих актуальных практических применений.

Пятая глава отведена под прикладные исследования. Приведена оптимизационная модель, моделирующая облученность в пространстве, которая за счет разработанного алгоритма позволяет рассчитать для требуемой эффективности обеззараживания необходимое количество установок с источниками УФ-излучения.

Проведенные в аккредитованных лабораторных центрах экспериментальные исследования показали, что импульсные установки «Альфа-06» и «Альфа-09» способны обеззараживать воздух помещения, контаминированный тестовыми микроорганизмом *S. Aureus*, объемом 22 м³ за время 22 с и 2 мин 38 с соответственно. Исследование эффективности обеззараживания поверхностей показало, что энергетическая экспозиция 12,6 Дж/м² позволяет снизить контаминацию *S. Aureus* на пластиковой чашке Петри более чем на 4 порядка. Белковое загрязнение существенно не влияло на эффективность обеззараживания контаминированных пластиковых тест-объектов, в то время как тип используемой поверхности (пластик, кафель, металл) – наоборот.

В рамках международной программы «ЭкзоМарс» были проведены исследования по определению наиболее устойчивых штаммов микроорганизмов и по разработке условий и методов обработки поверхностей крупногабаритных и небольших размеров изделий. Показано, что использование этилового спирта совместно с импульсным УФ-излучением сплошного спектра позволяет достигать эффективностей не менее 4 lg при обработке объектов, размещенных в полиэтиленовых пакетах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Выполненный научно-технический анализ литературы выявил недостаток работ по повышению КПД излучения и срока службы в УФ-области спектра импульсных ксеноновых ламп и влияния на них способа инициирования.

2. Экспериментально установлено, что использование для инициирования разряда контрагированного слаботокового вспомогательного разряда постоянного тока позволяет поднять срок службы импульсной ксеноновой лампы в спектральном диапазоне 200-300 нм более чем в 10 раз по сравнению с последовательным способом инициирования. При этом замена серийно используемого поверхностного инициирования разряда на осесимметричное формирование плазменного канала после наработки в 1 млн. импульсов обеспечивает снижение энергии излучения в спектральном диапазоне 200-300 нм от начального значения менее чем на 10 % в сравнении с 62 % в случае поверхностного инициирования.

3. Реализация осесимметричного способа инициирования разряда при пиковой объемной электрической мощности 405 кВт/см^3 позволила обеспечить срок службы импульсной ксеноновой лампы 36 млн. импульсов при КПД излучения 8,4 % в спектральном диапазоне 200-300 нм.

4. Полученные в диссертации результаты исследований по повышению КПД излучения ксенонового разряда посредством сужения диаметра плазменного канала до 3 мм, позволили при пиковой объемной электрической мощности 771 кВт/см^3 увеличить КПД излучения в спектральном диапазоне 200-300 нм до 11,9 %, а срок службы импульсной лампы – до 246 млн. импульсов.

5. Предложенное в диссертации новое техническое решение конструкции газоразрядной лампы, основанное на применении для ограничения ксенонового разряда системы из сапфировой и кварцевой оболочек, обеспечило при пиковой объемной электрической мощности $1,3 \text{ МВт/см}^3$ повышение КПД излучения до 15 % в спектральном диапазоне 200-300 нм.

6. Для снижения активно-индуктивных потерь в разрядном контуре исследован механизм инициирования разряда путем введения в разрядный промежуток короткодуговой импульсной газоразрядной лампы электрода зажигания, что позволило достичь уровня энерговыклада в плазму 92 % и получить КПД излучения 5,4 % в спектральном диапазоне 250-290 нм.

7. Внедрение полученных результатов режимов работы импульсных ксеноновых ламп в конструкцию импульсных УФ-установок серий «Альфа» и «Уанех» обеспечили эффективность ОЭСО для обеззараживания поверхностей более 99,99 %.

8. Для практического применения разработаны модели, позволяющие рассчитывать эффективность обеззараживания различных стационарных и движущихся сред и объектов, предложены прикладные программы выбора оптимального количества источников излучения для решения задачи фотобиологического обеззараживания помещений известных габаритов и для расчета режимов работы импульсной газоразрядной лампы в проточных фотохимических системах.

Основные публикации по теме диссертационной работы

В ходе выполнения диссертационной работы опубликовано 22 печатные работы в рецензируемых российских и иностранных журналах, 12 работ в сборниках тезисов на международных и российских конференциях, 1 патент на изобретение.

Основные статьи в журналах из списка ВАК:

1. Киреев С.Г., Гавриша С.В., Шашковский С.Г. Влияние механизма инициирования сильноточного импульсного ксенонового разряда на оптическую деградацию кварцевой оболочки в УФ-области спектра // Успехи прикладной физики. 2022. - Т.10, № 1. – С. 90-96.

2. Киреев С.Г., Гавриш С.В., Кулебякина А.И., Шашковский С.Г. Зависимость эффективности УФ-излучения импульсных ксеноновых ламп от объемной плотности мощности разряда // Прикладная физика. 2021. № 6. С. 24-29.

3. Тумашевич К.А., Киреев С.Г., Шашковский С.Г., Пугачев Д.Ю. Импульсная лампа с ограничивающей разряд системой из кварцевой и сапфировой оболочек // Успехи прикладной физики. 2019. Т.7. № 6. С. 608-613.

4. С.Г. Киреев, А.И. Кулебякина, С.Г. Шашковский, К.А. Тумашевич Алгоритм расчета характеристик импульсного газоразрядного источника УФ-излучения для проточных систем биоочистки // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 71-77.

5. Температурные поля кварцевых и сапфировых оболочек газоразрядных источников излучения / Гавриш С.В., Киреев С.Г., Пучнина С.В. и др. // Успехи прикладной физики. – 2020. - Т.8, №4, - С. 251 - 264

6. Характеристики излучения короткодуговых ксеноновых газоразрядных ламп высокого давления / Гавриш С.В., Киреев С.Г., Логинов В.В. и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2019. - №6 (129). – С. 50 – 63.

7. Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В., Киреев С.Г. Особенности технологии пайки металлическими припоями электродов газоразрядных приборов // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. 2020. № 3 (546). С. 101-107.

8. Киреев С.Г., Тумашевич К.А., Шашковский С.Г., Абакумов А.В., Осин Н.А. Калибровка фотоэлектрических приемников импульсного излучения // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 11 (743). С. 79-84.

9. С.Г. Киреев, С.Г. Шашковский, К.А. Тумашевич, А.В. Абакумов Метод вычисления энергоэффективности газоразрядных импульсных ламп // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2020. -Т. 1, № 1. С.

10. Камруков А.С., Киреев С.Г., Козлов Н.П., Шашковский С.Г. Энергетические и излучательные характеристики импульсной короткодуговой ксеноновой лампы в режимах “насыщенной” световой яркости // Журнал прикладной спектроскопии. 2017. Т. 84. № 4. С. 635-642.

11. С.Г. Киреев, А.И. Кулебякина, С.Г. Шашковский Высокояркостный бактерицидный источник излучения на основе искрового разряда в ксеноне // Журнал прикладной спектроскопии. - 2019. - Т. 86, № 4. С. 634-638.

Статьи в журналах из списка Scopus и Web of Science:

1. S G Kireev, S G Shashkovskiy and K A Tumashevich Electrical and spectral energy measurement techniques of pulsed continuous spectrum radiation sources // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1598 012005.

2. K A Tumashevich, S G Kireev, S G Shashkovskiy, D Yu Pugachev, N A Levichev, G S Leonov and Y A Goldshteyn Pulsed continuous spectrum radiation source with a quartz-sapphire envelope // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1598 012004.

3. Nikita Levichev, Yuliia Lagunova, Aleksandr F. Seliverstov, Sergey G. Kireev et al. Photodecomposition of sodium dodecyl sulfate under high-intensity pulsed UV radiation of continuous spectrum and hydrogen peroxide // Desalination and Water Treatment, 2020, 196, P. 131-136.

Основные патенты:

1. Патент РФ на изобретение RU 2673062 С1 Импульсная ультрафиолетовая газоразрядная лампа. / В.П. Архипов, Я.А. Гольдштейн, С.Г. Киреев и др. // 22.11.2018 -Бюл. № 33.

Основные конференции:

1. Особенности конструирования высокоинтенсивных импульсных ксеноновых источников УФ-излучения / С.В. Гавриш, С.Г. Киреев, Д.Н. Кугушев, С.В. Пучнина // VIII Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛаПлаз-2022. 22-23 марта 2022 г. Москва.

2. Влияние излучения ксеноновой плазмы на оптическое пропускание кварцевых оболочек импульсных газоразрядных ламп / С.В. Гавриш, С.Г. Киреев, Д.Ю. Пугачев, С.Г. Шашковский // Тез. Докл. XI Международная конференция по фотонике и информационной оптике. 26-28 января 2022 г.

3. Спектрально-энергетические характеристики излучения ксеноновой плазмы импульсного источника УФ-излучения / С.В. Гавриш, С.Г. Киреев, Д.Ю. Пугачев, С.Г. Шашковский // Тез. Докл. XVII Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». 17-19 ноября 2021 г. Томск.

4. Влияние конструктивных характеристик импульсной ксеноновой лампы на электрофизические свойства плазмообразующей среды / С.В. Гавриш, С.Г. Киреев, Д.Ю. Пугачев, и др. // Тез. Докл. научно-практической конференции «Физико-технические интеллектуальные системы» (ФТИС-2022), 8-10 февраля 2022, г. Москва.

5. Исследование температурного поля электрода импульсного ксенонового газоразрядного источника излучения / С.В. Гавриш, С.Г. Киреев, Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев // Тез. Докл. Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». Секция 9. Плазменная электроника. 18-20 ноября 2020 г. Томск.

6. Оптические свойства сапфира и кварцевого стекла в условиях воздействия импульсного излучения газоразрядной плазмы / Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В., Киреев С.Г. // В сборнике: Инженерные исследования. Труды научно-практической конференции с международным участием. – С. 2020. С. 51-57

7. Исследование излучательных характеристик трехэлектродной импульсной короткодуговой ксеноновой лампы / Киреев С.Г., Кулебякина А.И., Шашковский С.Г. и др. // Тез. докл. III Международная конференция "Высокоинтенсивные физические факторы в биологии, медицине, сельском хозяйстве и экологии», 04-06 октября 2011 года. Саров

8. Применение импульсной короткодуговой лампы высокого давления в рециркуляционных устройствах / Киреев С.Г., Шашковский С.Г. // Тез. докл. IX международный симпозиум по радиационной плазмодинамике. 2012. Звенигород. С. 214-216.

9. Evaluation of pulsed xenon ultraviolet irradiation of continuous spectrum for efficacy against multidrug-resistant nosocomial strains / Kireev S. Shashkovskiy S., Grenkoca T. etc. // 4.22nd World Congress & Exhibition. Ozone and Advanced Oxidation. Leading-edge science and technologies. 2013. Barcelona. P. 18.1-1-18.-6.

10. Electrical and spectral energy measurement techniques of pulsed continuous spectrum radiation sources / Kireev S.G., Shashkovskiy S.G., Tumashevich K.A. // Тез. докл. межд. конф. 8th international workshop and summer school on plasma physics. 2018.

11. Pulsed continuous spectrum radiation source with a quartz-sapphire envelope / Tumashevich K.A., Kireev S.G., Shashkovskiy S.G. etc. // Тез. докл. межд. конф. 8th international workshop and summer school on plasma physics. 2018.

12. Использование импульсного ультрафиолетового излучения для обеспечения планетарного карантина в межпланетных миссиях автоматических космических аппаратов / Гуридов А.А., Дешевая Е.А., Киреев С.Г. и др.// Тез. докл. на конф. Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники. – Эйдос. С. 178-179.

13. Surface decontamination of “Exomars-2020” martian landing module elements by pulsed uv irradiation / S.G. Shashkovskiy, E.A. Deshevaya, S.G. Kireev etc.// Abs. book The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3). М.: ИКИ РАН. 2016. С. 247ab.