

На правах рукописи



Кугушев Дмитрий Николаевич

**«РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ
С U-ОБРАЗНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ КАНАЛОМ
ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОЗДУХА И ПОВЕРХНОСТЕЙ»**

Специальность 2.2.1 – «Вакуумная и плазменная электроника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2021

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

Научный руководитель: **Гавриш Сергей Викторович**
доктор технических наук, начальник отдела
источников света ООО «Научно-производственное
предприятие «Мелитта»

**Официальные
оппоненты:** **Коненков Николай Витальевич**
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей и теоретической физики
Рязанского государственного университета
имени С. А. Есенина

Товстоног Валерий Алексеевич
доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
заместитель главного редактора
журнала «Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Ведущая организация: **Институт светотехники и электроники**
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева», г. Саранск.

Защита состоится «**18**» **ноября 2021 г. в 14-30** 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 «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 74.1.008.01
кандидат технических наук, доцент



Куликова И.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время использование импульсного ксенонового разряда в качестве источника ультрафиолетового (УФ) излучения позволило в ООО «НПП «Мелитта» (г. Москва) впервые в мире создать и внедрить в серийное производство инновационную плазменно-оптическую технологию обеззараживания воздуха и открытых поверхностей помещений (Патенты RU2001629, RU2396092, US6264802 и др.). Преимуществами разработанного метода является, во-первых, высокая интенсивность импульсного УФ-излучения опико-электронных систем (ОЭС) обеззараживания, в сотни раз превышающая мощность излучения самых эффективных бактерицидных установок с ртутными лампами низкого давления, что сокращает на порядок время дезинфекции помещений. Во-вторых, излучение импульсного ксенонового разряда обладает сплошным спектром в диапазоне 200 – 300 нм и, следовательно, оказывает многоканальное разрушающее действие на основные структуры клетки бактерий (ДНК, РНК, мембраны, белки и др.). Поэтому для обеспечения бактерицидной эффективности не менее 99,9% в случае использования импульсного УФ-излучения требуется энергетическая экспозиция (доза) на порядок ниже, чем при облучении поверхности ртутными лампами низкого давления. В-третьих, импульсные ксеноновые лампы не содержат ртути и других токсичных химических веществ, поэтому являются экологически чистыми.

Конструктивно импульсная газоразрядная лампа представляет собой наполненную ксеноном разрядную трубку из оптически прозрачного в УФ диапазоне кварцевого стекла (кварца), в концевых частях которой установлены электродные узлы. Генерация излучения плазменным каналом осуществляется при разряде накопительного конденсатора, емкость которого в совокупности с величиной приложенного рабочего напряжения определяют энергию и длительность вспышки.

Из научных источников известно, что для увеличения мощности УФ-излучения требуется повышение электрической энергии, вкладываемой в ксеноновый разряд. На сегодняшний день такой способ улучшения эффективности газоразрядной лампы реализовать в полной мере невозможно в силу двух ограничений.

Во-первых, кварцевое стекло, используемое в качестве материала оболочки (колбы), ограничивающей ксеноновый разряд, выдерживает средние удельные электрические нагрузки до $W_{уд.н} = 50$ Дж/см² при длительностях вспышки до 200 мкс. Превышение указанных пределов неизбежно приводит к испарению оксида кремния с внутренней поверхности колбы, контактирующей с плазмой, и как следствие, к падению КПД излучения и долговечности газоразрядной лампы.

Во-вторых, сегодня в импульсных лампах отечественного производства применяется единая конструкция электродного узла, герметизация которого осуществляется обжатием кварцевым стеклом тонкой молибденовой фольги, которая не выдерживают токовые нагрузки более 50А.

В силу приведенных ограничений сегодня срок службы серийных импульсных источников УФ-излучения не превышает $2,5 \cdot 10^6$ импульсов. Поэтому для устранения указанных недостатков необходимо увеличить габаритные размеры плазменного канала и повысить площадь сечения токоввода в разрядный объем лампы. В первом случае для обеспечения компактности газоразрядной лампы разработчикам приходится прибегать к U-образной конфигурации разрядного промежутка, а вторая задача за рубежом решается использованием колпачково-стержневых токовводов. Такие изменения конструкции разрядной трубки неизбежно приводят к трансформации

теплофизического состояния лампы, изменению электрических параметров и характеристик излучения ксеноновой плазмы.

Поэтому сегодня при разработке конструкции импульсного источника УФ-излучения с указанными техническими решениями становится **актуальной** задача проведения исследований процессов в ксеноновой плазме, ограниченной кварцевой оболочкой, во взаимосвязи с режимами электрического питания, особенностями конструкции тоководов в разрядный объем и условиями эксплуатации импульсной лампы в составе ОЭС обеззараживания воздуха и поверхностей помещений.

Целью диссертационной работы является разработка импульсного ксенонового газоразрядного источника УФ-излучения с U-образной конфигурацией плазменного канала, обеспечивающего максимальную энергетическую экспозицию в спектральном диапазоне 200 – 300 нм при сроке службы выше $2,5 \cdot 10^6$ импульсов.

Поставленная цель включает решение следующих задач:

1. Посредством анализа научно-технической литературы, определить основные параметры и характеристики разрабатываемого газоразрядного источника ультрафиолетового излучения.

2. Разработать методики и сформировать аппаратное обеспечение для исследования электрических параметров, спектральных и энергетических характеристик УФ-излучения.

3. Доработать математическую модель импульсного ксенонового разряда в части учета ухода рабочего газа в балластный объем и выполнить расчетные и экспериментальные исследования факторов, влияющих на электрические параметры разряда и временные, спектральные и энергетические характеристики УФ-излучения разрабатываемой конструкции газоразрядной лампы.

4. Разработать конструкцию газоразрядного источника УФ-излучения с U-образным плазменным каналом и тоководами, рассчитанными на работу в условиях повышенных токовых нагрузок.

5. Исследовать физические и химические процессы, происходящие в материалах элементов конструкции при изготовлении и эксплуатации создаваемой газоразрядной лампы, разработать рекомендации по формированию технологии ее серийного производства.

6. Изучить характеристики разработанной импульсной ксеноновой лампы на соответствие эксплуатационным требованиям, предъявляемым к ОЭС для обеззараживания воздуха и открытых поверхностей помещений.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что **впервые:**

1. Математическая модель импульсного ксенонового разряда в приближении локального термодинамического равновесия, дополнена системой уравнений, включающей уравнения сохранения энергии, неразрывности плазмы и переноса излучения в балластных объемах при их заполнении плазмообразующей средой в течение прохождения импульса тока, что позволило увеличить точность расчетов параметров плазмы за счет учета ухода рабочего газа из межэлектродного промежутка.

2. Реализация доработанной математической модели позволила получить временные зависимости плотности тока, давления в межэлектродном пространстве и эффективного давления в импульсной лампе в ходе формирования квазистационарной стадии разряда и дальнейшего остывания плазмы. Экспериментально установлено, что при сохранении неизменным разрядного объема V_p с увеличением заэлектродного объема V_z , происходит снижение плотности разрядного тока и энергетической экспо-

зиции в спектральном диапазоне 200 – 300 нм. Полученные расчетные и экспериментальные данные позволяют при конструировании импульсных ламп выбирать исходное давление ксенона в разрядном объеме в зависимости от размера балластных областей.

3. Доказано экспериментально, что в процессе работы импульсной лампы с U-образным плазменным каналом воздействие излучения каждой из двух его параллельных частей приводит к росту температуры оболочки и повышению плотности разрядного тока в зависимости от спектра излучения импульсной ксеноновой лампы, что дает возможность прогнозировать параметры газоразрядных приборов с различными конфигурациями разряда и составами плазмообразующих сред.

4. Предложена методика расчета конструкции электродов, построенная на решении уравнения теплопроводности с учетом потери энергии излучением по закону Стефана – Больцмана, позволяющая определять температурный профиль электрода в зависимости от режимов разряда.

5. Представлены результаты исследований физических и химических процессов в материалах конструкции при пайке электрода и кварцевой оболочки разрядной трубки металлическими припоями, обеспечивающие надежность разработанной лампы и использование предложенной технологии в других газоразрядных приборах.

6. Исследования термодинамическим методом временной зависимости повышения температуры анода и катода при выходе лампы в номинальный режим работы во взаимосвязи с процессами в плазменном канале, изучение пространственного распределения излучения и влияния внешней оболочки на теплофизическое состояние разрядной трубки, позволили сформулировать технические требования к условиям эксплуатации импульсного источника УФ-излучения с U-образным плазменным каналом в составе ОЭС обеззараживания.

Теоретическая и практическая значимость. Научная значимость работы состоит в том, что комплекс представленных результатов, научных положений и выводов диссертационной работы, полученных при исследовании импульсного ксенонового разряда, способствует формированию новых знаний в области плазменной электроники, позволяет понять влияние конструктивных параметров газоразрядной лампы на характеристики плазмы и эффективность ее излучения.

Практическая ценность диссертационного исследования заключается в том, что:

1. Полученные в работе экспериментальные и расчетные результаты позволили впервые в России приступить к опытному производству импульсных ксеноновых ламп с колпачково-стержневым токовводом в составе ламповых узлов ФК 22/150 (МЮРА.433224ТУ) для типоряда установок обеззараживания УИК6-01-«Альфа», Уанех-2М, «Альфа-06».

2. Предложенные технические решения конструкции лампы в целом и ее отдельных узлов (электрод, оболочка, токоввод и т.д.) и разработанные технологические процессы (пайка, магнетронное напыление комбинации металлических слоев, лазерная сварка и т.д.) позволили снизить расход дорогостоящих материалов, повысить пооперационный процент выхода годных изделий и узлов, обеспечить надежность созданного импульсного источника УФ-излучения.

3. Экспериментальные и расчетные данные были использованы в разработках и серийном производстве ООО «НПП «Мелитта» (г. Москва), ОКБ «Гранат» АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» (г. Москва), АО «КБточмаш им. А. Э. Нудельмана» (г. Москва), о чем свидетельствуют Акты внедрения, прилагаемые к диссертации.

4. Разработанные конструкторские решения импульсных ксеноновых ламп могут быть использованы для усовершенствования новых плазменных устройств, обладающих повышенными токовой нагрузкой и долговечностью, например, источники накачки лазеров, светосигнальные газоразрядные лампы и т.д.

Методология и методы исследований. В работе использован комплексный подход к проведению исследований, включающий построение математических моделей, создание базы данных, программную реализацию расчетов по модели, исследования макетов и опытных образцов на экспериментальных установках и в составе серийных изделий методами, удовлетворяющими требованиям государственных стандартов (ГОСТ 30831-2002, ГОСТ 16263-70, ГОСТ 25359-82 и т.д.), РМ 11 337.005-78, выполнение конструкторских и технологических исследований на современном производственном и диагностическом оборудовании, прошедшем аттестацию по стандартным методикам.

При изучении структуры и свойств конструкционных материалов использовались методы поляризационной микроскопии (микроскопы МПС-1 и полярископ ПКС-250), рентгеноструктурного анализа (рентгенофлуорисцентный анализатор FISCHER-SCOPE X-RAY), исследования непрозрачных объектов в отражённом свете (металлографический микроскоп ММР-4).

При выполнении экспериментов применялись известные и специально разработанные методики и аппаратура электрических (делитель напряжения 1:1000, трансформатор тока LT 10000-S, киловольтметр С 511, нановольтметр В2-38), осциллографических (осциллографы С9-8, DS1052 E), фотометрических (УФ-радиометр ТКА-ПКМ, Аргус-06), спектрометрических (монохроматоры МДР-23, спектрофотометр СФ-2000, ИК-Фурье спектрометр ФСМ-1201), калориметрических (термоэлемент РТН-10С, измеритель мощности лазерного излучения ИМО-2Н), пирометрических (тепловизионная система SDS HotFind-LXT) исследований параметров импульсного газоразрядного источника УФ-излучения.

Некоторые результаты исследований получены по методикам и на экспериментальной базе научно - исследовательских институтов НИУ МИЭТ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, АО «НИИ «Элпа», ФГУП «НИИП», предприятий АО «Руспром» и ФГУП «НИИ НПО «Луч», при непосредственном участии в экспериментах автора диссертации.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Показано, что при средней удельной электрической мощности импульсной лампы 30 Вт/см в плазменном канале из – за ухода ксенона в балластные объемы давление газа в межэлектродном промежутке снижается на 40 – 50%, поэтому уменьшение отношения балластного заэлектродного объема к величине разрядного объема с 0,3 до 0,15 позволяет увеличить энергетическую экспозицию в спектральном диапазоне 200 – 300 нм более чем на 7 %.

2. Установлено, что при средней удельной мощности 30 Вт/см в импульсной ксеноновой лампе с U-образным плазменным каналом поглощение разрядом возвращенного обратно собственного излучения с длинами волн более 0,8 мкм приводит к увеличению плотности тока, и как следствие, повышению энергетической экспозиции на 12 % выше, чем у прямых импульсных источников УФ-излучения с аналогичными размерами межэлектродного пространства.

3. Определено, что в сравнении с серийными импульсными источниками УФ-излучения разработанные конструкция и технология импульсной ксеноновой лампы с

U-образным плазменным каналом позволяет повысить срок службы с $2,5 \cdot 10^6$ до 10^7 импульсов и увеличить выход годных изделий с 50 – 60% до 80 – 90%.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается систематическим характером экспериментальных исследований на аттестованном оборудовании, проведенных по стандартным методикам при удовлетворительном согласовании полученных данных с расчетно-теоретическими моделями, использованием комплекса современных физических, химических и металлографических способов исследований с многократной воспроизводимостью результатов экспериментов, проанализированных с применением современных методов обработки результатов измерений и практической проверкой сделанных научных выводов и рекомендаций в процессе эксплуатации разработанных газоразрядных источников УФ-излучения в серийно выпускаемых ОЭС для обеззараживания воздуха и открытых поверхностей помещений.

Научные положения, сформулированные в диссертационной работе, удовлетворительно согласуются с общепризнанными физическими теориями, результатами расчетов и экспериментов, представленных в многочисленных литературных источниках по тематике газового разряда, материаловедения и метрологии.

Апробация работы. Основные научные результаты по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на VIII Международном симпозиуме по радиационной плазмодинамике (г. Москва, 2009 г.), VII Международной светотехнической конференции (Хабаровск, 2009), XVI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2020 г.), на VI Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии «ЛаПлаз – 2021», X Международной конференции по фотонике и информационной оптике (Москва, 2021 г.), IV Международной конференции «САПР и моделирование в современной электронике» (г. Брянск, 2020 г.), Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики" (г. Воронеж, 2020г.), Всероссийской конференции «Радиационная стойкость электронных систем» (г. Лыткарино, 2010 г.), Международной конференции «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения» (Томск, 2020 г.), Международной конференции «Инженерные системы – 2020» (Москва, 2020 г.), Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и направления развития материаловедения и термической обработки металлов и сплавов» (Курск, 2020 г.), на 11 научных семинарах и совещаниях в ООО «НПП «Мелитта», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ОКБ «Гранат» АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» (г. Москва), АО «КБточмаш им. А. Э. Нудельмана» (г. Москва).

Личный вклад автора заключается в выборе цели и постановке задач диссертационного исследования, руководстве и непосредственном выполнении экспериментов, анализе полученных результатов, разработке методик испытаний и основных конструктивных и технологических решений, используемых в экспериментальных и серийных образцах газоразрядных источников УФ-излучения. При выполнении расчетных исследований личное участие автора диссертации заключалось в проведении расчетов, необходимых для интерпретации полученных экспериментальных результатов, в корректировке расчетных схем и программ. Автор принял непосредственное участие в подготовке научных публикаций и докладов по тематике диссертационного

исследования. Обсуждение полученных расчетных и экспериментальных результатов проводилось совместно с соавторами публикуемых статей. Соавторы, участвовавшие в исследованиях по отдельным направлениям, указаны в списке основных публикаций по теме диссертации.

В итоге автор внес решающий вклад в разработку вопросов, рассматриваемых в диссертационной работе.

Содержание диссертационного исследования.

Структура данной работы отражает направления решения поставленных задач. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения.

Во введении обоснована актуальность диссертации, сформулированы цель, задачи исследований, научная новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту и показана практическая ценность работы.

Первая глава посвящена научному анализу предпосылок создания импульсного газоразрядного источника УФ-излучения, по результатам которого формируются основные направления диссертационного исследования.

Обзор научных работ зарубежных авторов А.М. Ховатсона, В. Финкельнбурга, Г. Меккера, Л.И. Леба и др., а также результатов исследований отечественных специалистов в области физики газового разряда И.С. Маршака, Я.Б. Зельдовича, Ю.П. Райзера, Ю.Г. Басова, В.М. Градова, Г.А. Месяца и др. позволил прийти к следующим заключениям:

- В разрядах низкого давления (НД) преобладает резонансное излучение, КПД которого может достигать 80 – 90% от мощности, подводимой к плазменному столбу. В то же время импульсный ксеноновый разряд НД не пригоден для создания высокоинтенсивного источника УФ-излучения, так как резонансные линии ксенона 146,9 нм (8,45 эВ) и 129,5 нм (9,56 эВ) расположены вне левой границы прозрачности (около 200 нм) материалов оболочек газоразрядных ламп (кварц и сапфир).

- Увеличение давления плазмообразующей среды и плотности тока разряда приводит к формированию изотермической плазмы с наличием высоких градиентов температур, возрастанием поглощения резонансного излучения и, соответственно, с увеличением энергетических потоков континуума за счет рекомбинационно – тормозных механизмов потерь энергии электронов в плазме. При повышении давления (более $3,9 \cdot 10^4$ Па) и плотности тока (более 3000 А/см²) спектр излучения становится сплошным с максимумом интенсивности в диапазоне длин волн менее 300 нм.

- Спектральная плотность КПД в режимах разряда с длительностью тока менее 300 мкс в УФ-области спектра может достигать значений, в 2 – 4 раза более высоких, чем при длительных разрядах и той же удельной мощности. При этом происходит интенсивное испарение кварцевой оболочки, диссоциация двуокиси кремния и появление мощных линий излучения кремния 220, 245, 251, 253 и 288 нм.

В первой главе научно проанализировано взаимосвязанное влияние конструктивных характеристик и параметров разрядного контура на эффективность излучения импульсной ксеноновой лампы короткой длительности. В данном разделе приведены полученные отечественными исследователями Басовым Ю.Г., Ермаковым Н.И., Белосусовым Н.Н., Болдыревым С.А и др. основные математические соотношения, связывающие между собой электрические характеристики плазмы (сопротивление, плотность тока, электропроводность и др.), особенности конструкции разрядного объема лампы (диаметр и длина плазменного канала, давление ксенона и др.) и параметры разрядного контура (емкость, индуктивность, напряжение на рабочем конденсаторе),

которые в дальнейшем были использованы при оценке полученных в диссертации экспериментальных результатов. В заключительной части раздела показано, что важным параметром надежности лампы является предельная энергия вспышки, при которой происходит разрушение лампы. Установлено, что причины разрушения импульсных ламп связаны с воздействием ударных волн, термическими напряжениями в оболочке, испарением материала оболочки, ударным воздействием капель расплавленного материала электродов.

В разделе приведено полученное Кирсановым В.П. важное эмпирическое соотношение для предельной энергии: $W_{np} \approx 3250St^{\frac{1}{2}}$, где S – площадь внутренней поверхности разрядного промежутка лампы; t – длительность вспышки. Данное уравнение используется как ограничивающий фактор при экспериментальных исследованиях. Выполненное в главе 1 сопоставление достоинств и недостатков существующих в России и за рубежом тоководов в газоразрядные лампы позволило выбрать

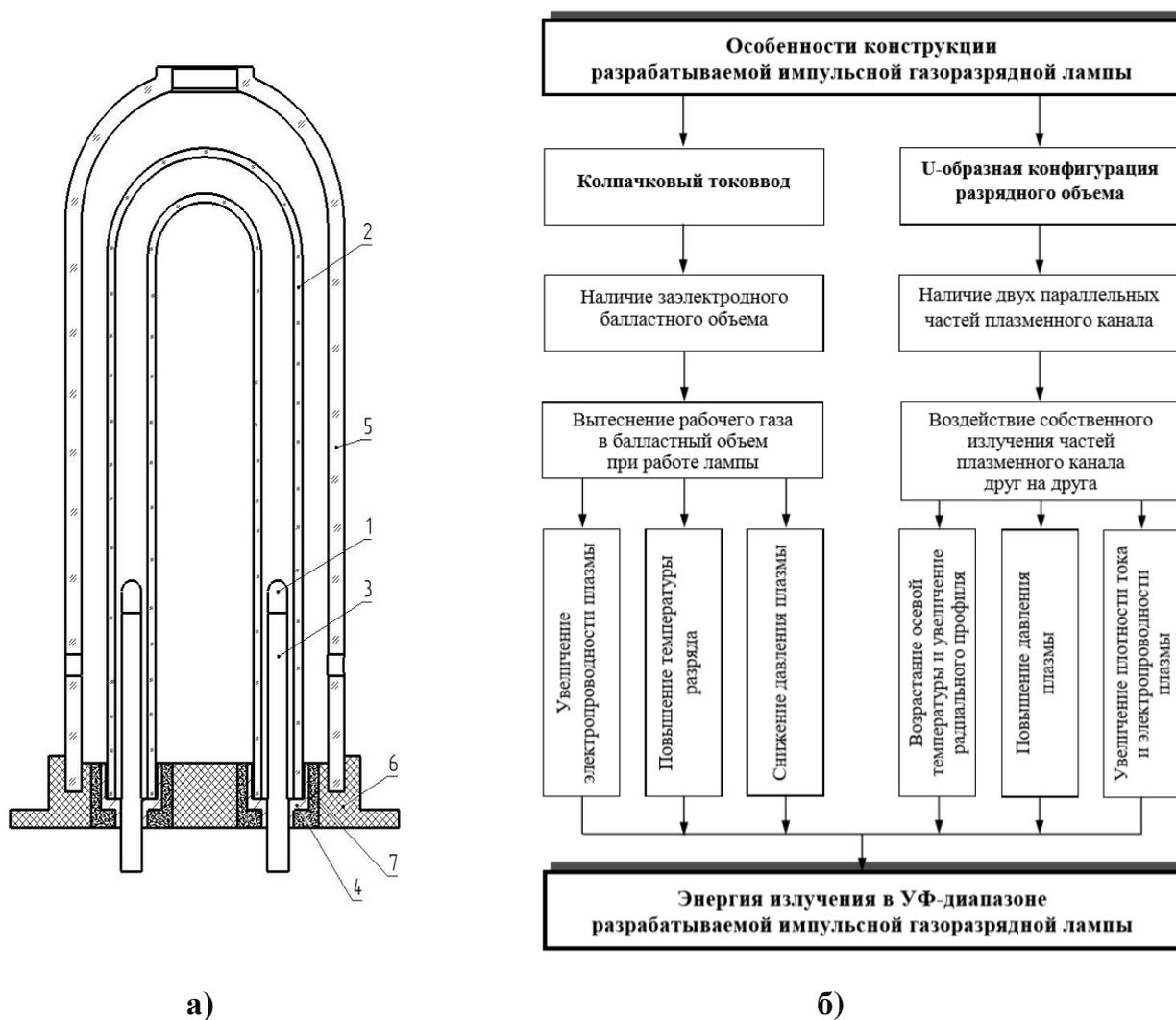


Рисунок 1. Устройство разрабатываемой импульсной лампы (а) и блок-схема (б) влияния конструктивных параметров на характеристики плазмы и энергию УФ-излучения

1 – электрод, 2 – разрядная трубка, 3 – держатель электрода, 4 – колпачок, 5 – внешняя колба, 6 – цоколь, 7 – герметик.

в качестве базовой конструкции колпачково-стержневой вариант электродного узла (рисунок 1а) в силу таких преимуществ как механическая прочность, отсутствие ограничений по токовой нагрузке, компактность токоввода, высокая технологичность, возможность механизации производства и т.д. Как следует из диаграммы (рисунок 1б), разработанной по результатам научного анализа научной литературы, придание U-образной конфигурации разрядному каналу и наличие заэлектродных (балластных) объемов, обусловленных особенностями выбранного типа токоввода, влечет за собой изменение характеристик ксеноновой плазмы. Представленные на рисунке зависимости позволили сформулировать основные направления исследований по созданию импульсного газоразрядного источника УФ-излучения для ОЭС.

Вторая глава посвящена расчетно-экспериментальным исследованиям характеристик импульсной ксеноновой плазмы, определяемых особенностями конструкции разрабатываемой импульсной лампы с U-образным плазменным каналом.

1. Наличие заэлектродных (балластных) объемов. На первом этапе посредством математического моделирования решался вопрос об изучении параметров плазмообразующей среды в процессе прохождения импульса разрядного тока. Для реализации поставленной задачи созданная профессором МГТУ им. Н.Э. Баумана Градовым В.М. (см. дисс... д-ра техн. наук. М., 2002. - 323с.) математическая модель импульсного ксенонового разряда, ограниченного кварцевой оболочкой, была дополнена уравнениями, учитывающими уход ксенона в заэлектродный объем. При этом предполагалось, что плазма находится в ЛТР, градиенты давления отсутствуют. С учетом принятых допущений математическая модель, описывающая заполнение заэлектродных объемов и включающая сохранения энергии (1), уравнения неразрывности плазмы (2), переноса излучения в диффузном предположении (3), (4), имеет вид:

$$\frac{\partial g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(gv) = 0 \quad (1)$$

где g , p , T – соответственно плотность, давление и температура плазмы; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; λ – коэффициент теплопроводности; x – координата от торца электрода в направлении оси лампы; v – скорость движения; R – радиус оболочки; r_e – радиус электрода; K_v – усредненный по частоте в спектральном интервале коэффициент поглощения плазмы; ρ_v – спектральный коэффициент отражения излучения поверхностью электрода; U_v – спектральная плотность излучения; U_{pv} – равновесная спектральная плотность

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho v c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{dp}{dt} - \operatorname{div} F_r + \frac{2\alpha}{R^2 - r_e^2} [(T - T_e)R + (T - T_e)r_e] \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{1}{3K_v} \frac{dU_v}{dx} \right) + K_v U_{pv} - \left[K_v + \frac{2}{3} \frac{1}{A_v (R^2 - r_e^2)} \frac{1 - \rho_v}{1 + \rho_v} (r_e + R) \right] U_v = 0 \quad (3)$$

$$\operatorname{div} F_r = c \int_0^{\infty} K_v (U_{pv} - U_v) dv \quad (4)$$

излучения; A_v – константа; T_c , T_e – температура оболочки и электрода соответственно; α – коэффициент теплоотдачи.

Реализация математической модели позволила получить временные зависимости плотности тока (рисунок 2), давления в разряде и эффективного давления в лампе $p_{0эф}$ (рисунок 3). Как видно из рисунка 3, в заэлектродные объемы уходит 40 – 50% наполняющего газа, который вытесняется практически за время достижения током максимум. На протяжении периода спада тока $p_{0эф}$ не изменяется, т.е. квазистационарное состояние в разряде реализуется при $p_{0эф} = \text{const}$. Характер изменения средней температуры в заэлектродной области по времени аналогичен изменению $p_{0эф}$. Установившееся значение ее составляет примерно 30% от средней температуры в разряде.

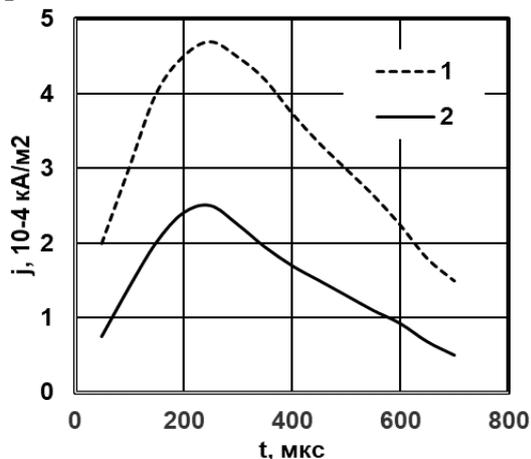


Рисунок 2. Временная зависимость средней плотности тока при напряжении на накопительном конденсаторе: $U_0 = 2000\text{В}$ (1) и 1000В (2)

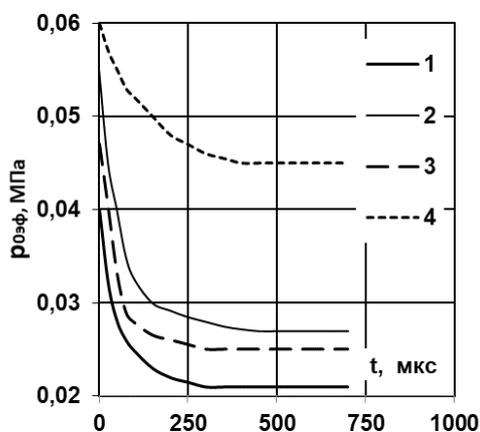


Рисунок 3. Временная зависимость эффективного давления при начальном давлении ксенона в лампе: 1 – 0,04; 2 – 0,053 ($U_0 = 1000\text{В}$); 3 – 0,053 ($U_0 = 2000\text{В}$); 4 – 0,078 МПа

В завершение расчетного раздела была сконструирована экспериментальная установка, позволившая присоединить к разрядному и заэлектродным объемам деформационные образцовые манометры и получить качественное подтверждение полученных расчетных результатов при работе лампы в номинальном режиме.

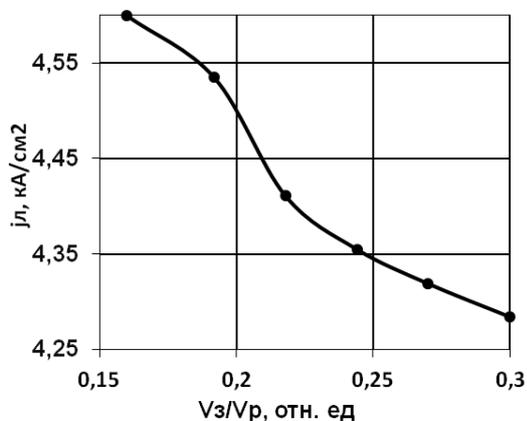


Рисунок 4. Зависимость плотности тока j_l в квазистационарной стадии разряда от соотношения V_z/V_p

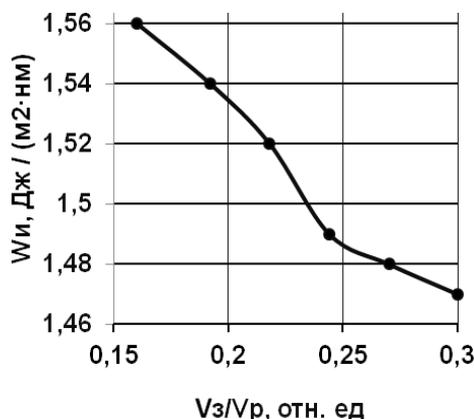


Рисунок 5. Зависимость энергетической экспозиции излучения W_u в спектральном диапазоне 200 – 300 нм от соотношения V_z/V_p

На втором этапе решена задача выявления зависимости параметров импульсной ксеноновой лампы от соотношения величин заэлектродного V_z и разрядного V_p объемов (V_z/V_p), определяющего долю газа, покидающего разряд в течение импульса разрядного тока (рисунок 4 и 5). Для реализации поставленной задачи была изготовлена партия ламп с различным соотношением V_z/V_p .

2. Влияние на характеристики ксеноновой лампы воздействия собственного излучения двух параллельных частей U-образного плазменного канала. В данном разделе на основе расчетно-экспериментальных исследований выявлено:

- В результате взаимного облучения обращенных друг к другу поверхностей происходит повышение их температуры на 40 – 60°C (рисунок 6). Данный вывод сделан из сравнения температурных полей при установке между параллельными частями разрядного канала водоохлаждаемого поглощающего излучение экрана и без него. Аналогичные результаты нами получены при использовании второго способа: измерения температурных профилей прямой лампы и после последующего придания этому же плазменному каналу U-образной конфигурации. Во всех описанных экспериментах одновременно проводились замеры осциллограмм тока, по которым выявлено повышение плотности тока на 420 А/см² в квазистационарной стадии разряда при наличии взаимного облучения частей каналов.

- Из полученных в результате реализации математической модели расчетных данных спектрального распределения коэффициента поглощения ксеноновой плазмы (рисунок 7) и КПД излучения импульсной лампы (рисунок 8) нами установлено, что нагрев поверхностей кварцевой оболочки производится мощностью излучения с длинами волн менее 0,2 мкм, а повышение средней температуры разряда, и как следствие, рост плотности тока разряда обусловлены поглощением энергии в ИК диапазоне, начиная с 0,8 мкм.

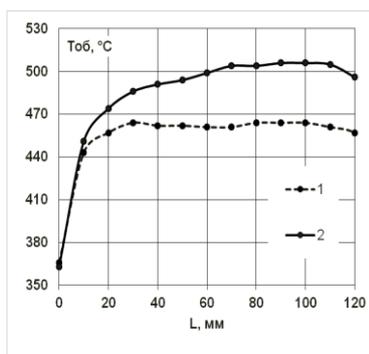


Рисунок 6. Распределение температуры оболочки лампы с охлаждаемым экраном (1) и без него (2).

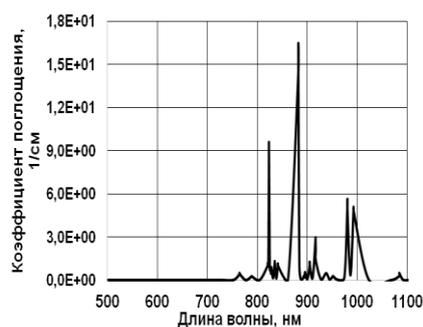


Рисунок 7. Коэффициент поглощения плазмы Хе в спектральном диапазоне 0,5 – 1,1 мкм, $p_0=15$ атм., $T=8000$ К.

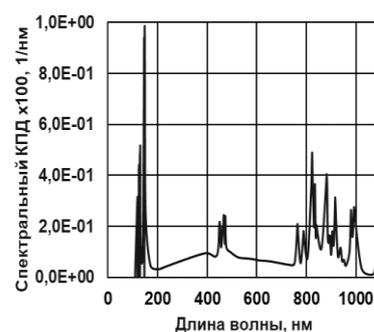


Рисунок 8. Спектральное распределение КПД излучения ксенонового разряда в максимуме тока. $R=0,35$ см, $p_0=108$ мм рт.ст., $\langle w \rangle = 0,3 \cdot 10^5$ Вт/см³

В второй главе подробно рассмотрены методики исследований температурного профиля кварцевой оболочки, электрических параметров и характеристик УФ-излучения разрабатываемого газоразрядного источника.

В главе 3 рассмотрены основные разработанные конструктивные решения электрода и токоввода в разрядный объем, представлены результаты исследования физико-химических процессов, происходящих при их изготовлении и, как следствие, определяющие надежность разрабатываемой газоразрядной лампы. Для организации промышленного выпуска импульсной газоразрядной лампы колпачкового типа, обеспечивающей высокую долговечность в главе решены следующие задачи:

1. Разработана конструкция электродов, обеспечивающая длительную и устойчивую работу в режиме разовых вспышек.

• Путем решения уравнения теплопроводности рассчитано стационарное распределение температуры вдоль поверхности электрода, представляющего собой систему из двух примыкающих друг к другу круглых цилиндров различного диаметра, охлаждаемых с боковой поверхности излучением по закону Стефана – Больцмана. В результате проведенных математических преобразований для вольфрамового электрода получено уравнение, описывающее продольное распределение температуры:

$$\frac{T}{T_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + 4,26 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{T_1^2}{\sqrt{R}}\right) \cdot z}}$$

где T_1 – температура торцевой поверхности цилиндра, T и z – текущие температура и координата, R – радиус цилиндра.

Для проверки полученного математического выражения была изготовлена экспериментальная установка, позволяющая пирометрическим способом определить продольный температурный профиль электрода при нагреве его торцевой части токами высокой частоты. В результате получено качественное совпадение расчетных и экспериментальных температурных полей.

На основе полученных температурных зависимостей и анализа физико-химических свойств существующих вакуумных материалов разработана конструкция составного электрода, собираемого пайкой его основных элементов. Главная сложность задачи заключалась в создании конструкции, обеспечивающей концентрацию плазменного канала на сферической рабочей поверхности электрода и исключаяющей проникновение разряда в заэлектродную область.

Проблема решена выбором материалов (рисунков 9) держателя 2 (молибден) и припоя 4 (никель) с работой выхода электронов на 2 – 3 эВ выше, чем у вещества рабочей части 1 электрода (торированный вольфрам, скандат бария).

На завершающем этапе конструирования электрода исследованы физико-химические процессы, происходящие при формировании спая входящих в состав электрода молибденовых держателя 2 и втулки 3 посредством расплава никеля 5. Показано, что при расплавлении и капиллярном подъеме расплава припоя происходят одновременно механизмы статического и динамического взаимодействия с образованием стабильной промежуточной фазы.

МоNi4 и твердого раствора никеля в молибдене, что обеспечивает высокую механическую прочность электрода. В итоге исследований внедрена в производство высокотехнологическая конструкция, позволившая исключить напыление на разрядную

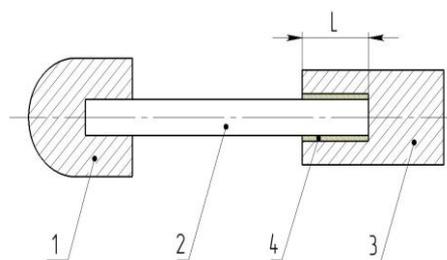
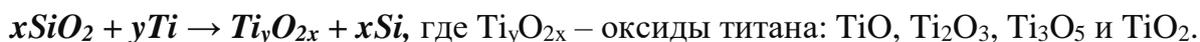


Рисунок 9. Конструкция электрода, изготовленного по предлагаемой технологии.

1 – катод (анод), 2 – молибденовый держатель, 3 – молибденовая втулка, 4 – припой, 5 – изоляционная втулка.

часть лампы любых материалов, входящих в состав электрода, кроме эмиссионного вещества рабочей части.

В главе 3 разработано соединение кварцевой разрядной трубки с электродным узлом (токоввод, рисунок 10) посредством высокочастотной пайки легкоплавким припоем на основе олова по предварительно нанесенному магнетронным способом титановому покрытию. Для решения этой задачи в главе выполнен термодинамический анализ возможности протекания реакций при формировании спая:



На рисунке 11 представлены температурные зависимости стандартной энергии Гиббса образования ($\Delta_f G^0_T$) оксида кремния и оксидов титана в пересчете на 1 моль O_2 . Видно, что стандартная энергия Гиббса образования оксидов титана имеет более отрицательные значения, чем для оксида кремния, поэтому при высоких температурах реакция восстановления кварцевого стекла титаном энергетически выгодна. Причем, чем ниже степень окисления получившегося оксида титана, тем выше вероятность образования соединения. В разделе изучена растекаемость припоя по паяемым поверхностям, выявлен механизм реакций на границах раздела кварц – титан, олово – титан. В итоге показано, что на границе кварц – титан образуется силицид титана, а для получения надежного спая необходимо обеспечить соотношение $d_2/d_1 \geq 1,3 - 1,5$ (рисунок 10).

В заключении главы даны рекомендации по разработке серийной технологии производства предложенных конструктивных решений.

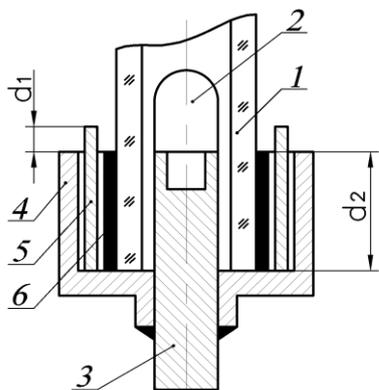


Рисунок 10. Конструкция токоввода лампы колпачкового типа. 1 – кварцевая оболочка, 2 – электрод, 3 – держатель электрода, 4 – коваровый колпачок, 5 – припой, 6 – слой титана, d_1 – высота выступающей части припоя, d_2 – длина спая

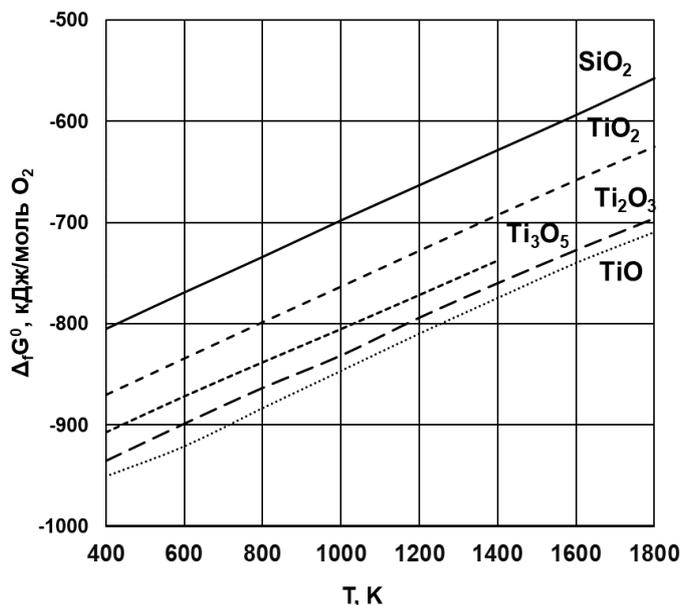


Рисунок 11. Температурная зависимость энергии Гиббса образования оксидов кремния и титана

Четвертая глава посвящена изучению основных эксплуатационных характеристик разработанной импульсной ксеноновой лампы с колпачковым токовводом. Одним из важнейших параметров газоразрядной лампы является момент стабилизации электрических и излучательных параметров (время готовности) лампы. В главе исследованы процессы формирования плазменного канала при выходе в номинальный

режим работы. В качестве критериев приняты плотность разрядного тока (рисунок 12), сопротивление плазмы и температура электродов (рисунок 13).

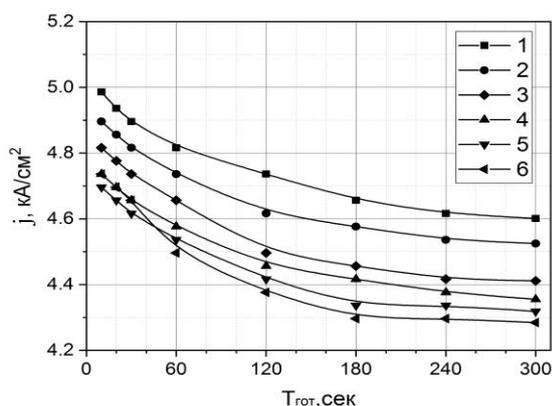


Рисунок 12. Временная зависимость плотности разрядного тока для различных соотношений V_x/V_p : 1 – 0,16; 2 – 0,192; 3 – 0,218; 4 – 0,244; 5 – 0,270; 6 – 0,3.

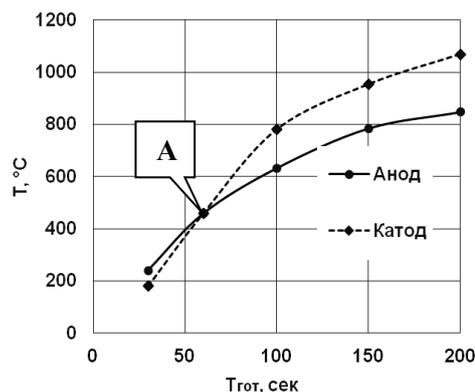


Рисунок 13. Температура электродов разрабатываемой импульсной ксеноновой лампы в процессе выхода в номинальный режим работы.

В главе впервые предложена оригинальная методика термпарного измерения температуры электродов в максимальном приближении к месту соприкосновения рабочей поверхности с плазмой. Выявлено, что в момент зажигания температура катода ниже, чем анода (рисунок 13), но в определенный момент (точка А) температуры выравниваются и далее скорость роста температуры катода превышает анодную. Данный эффект связан с балансом энергетических потерь плазмы в зоне контакта с рабочей поверхностью электрода. Таким образом, как следует из результатов, полученных в работе (рисунок 12 и 13) по истечении 200 сек. лампа достигает номинальных параметров эксплуатации.

Другой важной характеристикой разработанной лампы является пространственное распределение излучения (индикатриса) в УФ и ИК спектральных диапазонах. Измерения проведены при повороте работающих ламп в трех плоскостях от 0° до 180° (рисунок 14). По результатам исследований проведен анализ формы индикатрис и даны рекомендации по оценке времени экспозиции.

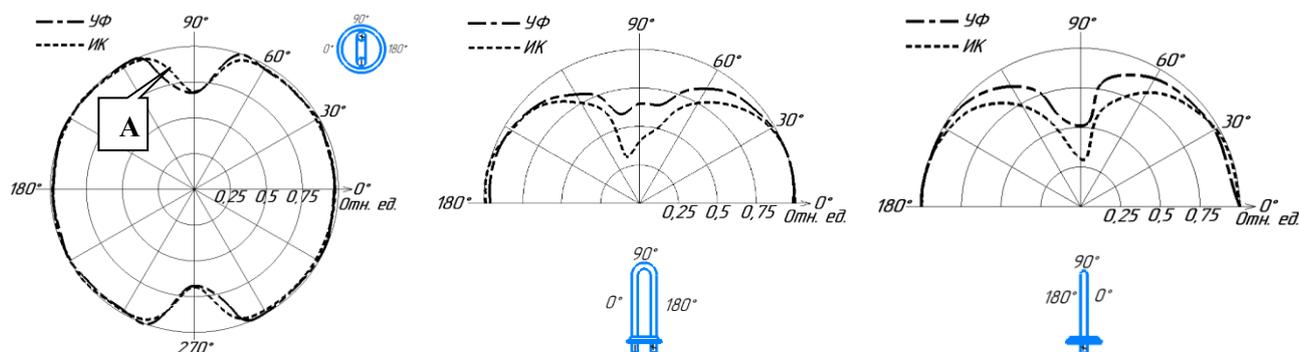


Рисунок 14. Пространственное распределение излучение разработанной лампы в УФ и ИК спектральных диапазонах.

Для исключения вредного воздействия, возникающего в процессе работы лампы, озона применяется внешняя кварцевая колба. В диссертации проведены сравнитель-

ные исследования электрических параметров лампы при работе с наружной оболочкой и без нее. Показано незначительное влияние на параметры лампы, например, температура оболочки разрядной трубки возрастает на 100°C при ее размещении во внешнюю колбу.

В заключительном разделе проведено сопоставление параметров серийной и разработанной ламп. Показано преимущество в надежности и технологичности разработанной газоразрядной лампы, даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию разработанного импульсного источника УФ-излучения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате анализа научно-технической литературы установлено, что основным способом повышения интенсивности импульсного ксенонового источника УФ-излучения является наращивание электрической энергии разряда, что влечет за собой необходимость повышения токовой нагрузки на электрические вводы и увеличения длины разрядного промежутка. Доказано, что удовлетворяет перечисленным требованиям импульсная ксеноновая лампа с U-образным плазменным каналом и колпачково-стержневым токовводом.

2. Математическая модель импульсного ксенонового разряда дополнена системой уравнений, включающей уравнения сохранения энергии, неразрывности плазмы и переноса излучения в балластных объемах импульсной лампы при их заполнении плазмообразующей средой в течение прохождения импульса тока, что позволило увеличить точность расчетов параметров плазмы за счет учета вытеснения рабочего газа в заэлектродные объемы. Реализация доработанной расчетной модели позволила:

- определить, что в балластные объемы уходит 40 – 50% наполняющего газа, который вытесняется практически за время достижения током максимума t_m .

- установить, что на протяжении периода спада тока эффективное давление разряда $p_{0эф}$ не изменяется, т.е. квазистационарное состояние в разряде реализуется при $p_{0эф}=\text{const}$.

- сформировать аппроксимационные зависимости электрофизических характеристик импульсной ксеноновой лампы от начального давления, плотности тока и радиуса разрядной трубки, что послужило основой при создании конструкции разрабатываемой лампы.

3. Выполненные экспериментальные исследования позволили определить:

- Влияние заэлектродного объема V_z на электрические параметры и характеристики УФ-излучения. Показано, что при фиксированной величине разрядного объема V_p уменьшение отношения V_z/V_p приводит к корреляционному повышению плотности тока и энергетической экспозиции в спектральном диапазоне 200 – 300 нм на 7 %.

- Зависимость характеристик ксеноновой лампы от воздействия собственного излучения двух параллельных частей U-образного плазменного канала. Установлено, что в результате взаимного облучения обращенных друг к другу поверхностей кварцевой разрядной оболочки происходит повышение плотности тока на 420 A/cm^2 в квазистационарной стадии разряда и, как следствие, рост энергетической экспозиции в спектральном диапазоне 200 – 300 нм на 12 %. Доказано, что основной вклад в рост температуры плазмы оказывает собственное излучение импульсной лампы с длинами волн более 0,8 мкм.

4. Для создания базовой конструкции и технологии создаваемого импульсного источника УФ-излучения:

- Разработана конструкция электродов, обеспечивающая длительную и устойчивую работу в режиме разовых вспышек. Путем решения уравнения теплопроводности

сти с учетом охлаждения с боковых поверхностей излучением по закону Стефана – Больцмана, а также экспериментальными исследованиями по разработанным оригинальным методикам, определены оптимальные температурные режимы работы и предложена конструкция составного катода, основанная на пайке его составных элементов с учетом особенностей воздействия плазмы на рабочую поверхность и физико-химических процессов, происходящих при формировании спая. Выполненные конструкторские исследования позволили обеспечить срок службы не менее 10^7 импульсов.

- Разработан способ соединения кварцевой разрядной трубки с электродным узлом посредством высокочастотной пайки легкоплавким припоем на основе олова по предварительно нанесенному магнетронным способом титановому покрытию. Выполнен термодинамический анализ протекающих реакций и экспериментально изучены процессы формирования спая кварц – ковар. Предложенная технология изготовления импульсной ксеноновой лампы с колпачково-стержневым токовводом и U-образным плазменным каналом позволила увеличить выход годных изделий до 80 – 90% в сравнении с 50 – 60% в случае серийных источников УФ-излучения.

5. Изучены эксплуатационные характеристики разработанной лампы. Впервые исследованы процессы, происходящие в разряде и ограничивающей его кварцевой оболочке при выходе в номинальный режим работы, представлены результаты исследований пространственного распределения излучения U-образного плазменного канала в УФ и ИК спектральных диапазонах. Изучено влияние внешней кварцевой колбы на параметры разработанной лампы и даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию предложенной конструкции импульсного источника УФ-излучения.

Основные публикации по теме диссертационной работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в 40 печатных работах; в их числе 8 статей в российских и иностранных журналах, 12 докладов на Российских и международных научно-технических конференциях, 20 патентов на полезную модель.

Основные статьи в периодических журналах перечня ВАК РФ:

1. Повышение предельной величины удельной мощности импульсных ксеноновых газоразрядных ламп. / С.В. Гавриш, Д.Н.Кугушев, С.В. Пучнина и др. // Прикладная физика. – 2020. - №3. – С. 69 - 74.

2. Температурные поля кварцевых и сапфировых оболочек газоразрядных источников излучения / С.В. Гавриш, Д.Н.Кугушев, С.В. Пучнина и др. // Успехи прикладной физики. – 2020. - Т.8, №4. – С. 261 – 264.

3. Гавриш С. В., Кугушев Д. Н. Влияние на характеристики плазмы собственного отраженного излучения газоразрядной лампы //Прикладная физика, 2021. - № 1. – С. 31 – 38.

4. Пространственное распределение излучения импульсных ксеноновых газоразрядных ламп с различной конфигурацией плазменного канала. / Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., и др. // Прикладная физика. – 2021. - №2. – С. 37 - 44.

5. Оптические системы прожекторного типа на основе комбинации источников оптического излучения / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев и др. // Светотехника. – 2011. - №1.- С. 12-15.

6. Разработка модулируемых цезиевых источников ИК излучения повышенной мощности // С.В. Гавриш, В.М. Градов, Д.Н. Кугушев и др. // Прикладная физика. – 2010. - №2. – С. 85-90.

7. Особенности технологии пайки металлическими припоями электродов газоразрядных приборов Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В. // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ – техника. – 2020.- вып. 3 (546). – С. 101 - 107

8. Создание вакуумноплотных соединений кварцевого стекла с металлами активной пайкой мягкими припоями Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Логинов В.В., Пучнина С.В // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ – техника. – 2020.- вып. 4 (547). – С. 82-89.

Основные патенты:

1. Патент РФ (полезная модель) № 103668. Газоразрядный импульсный источник высокоинтенсивного ультрафиолетового излучения. МПК H01J 61/30 /С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, С.Г. Шашковский и др. // 20.04.2011, Бюл. №11.

2. Патент РФ (полезная модель) № 97211. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК H01J 61/00 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев, и др. // 27.08.2010, Бюл. №2.

3. Патент РФ (полезная модель) №152355.Короткодуговая ксеноновая лампа для устройства оптоэлектронного противодействия инфракрасным головкам самонаведения управляемых ракет. МПК H01J 61/02/ С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов и др. // 27.05.2015, Бюл. №15.

4. Патент РФ (полезная модель) № 97213. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК H01J 65/00 /С.В. Гавриш, В.С. Жмаев, Д.Н. Кугушев, и др. // 27.08.2010, Бюл. №32.

5. Патент РФ (полезная модель) № 100671. Токоввод цезиевой лампы с двумя лейкосапфировыми оболочками. МПК H01J 61/02 /С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов, и др. // 20.12.2010, Бюл. №35.

6. Патент РФ (полезная модель) № 93582. Короткодуговая ксеноновая лампа для устройства оптико-электронного противодействия. МПК H01J 61/02 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев, О.В. Шумейко // 27.04.2010, Бюл. №12.

7. Патент РФ (полезная модель) № 111348. Газоразрядный источник инфракрасного излучения для устройства оптико-электронного противодействия. МПК H01J 61/30 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев и др.//10.12.2011, Бюл. №34.

8. Патент РФ (полезная модель) № 118045. Бортовая станция активных помех для индивидуальной защиты летательных аппаратов от управляемых ракет с инфракрасными головками самонаведения. МПК F41H 11/02, МПК F42B 5/15 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев и др. // 10.07.2012, Бюл. №19.

9. Патент РФ (полезная модель) № 88121, МПК F41H 13/00. Устройство индивидуальной защиты летательного аппарата от управляемых ракет с оптическими головками самонаведения. /С.В. Гавриш, Б.И. Желтиков, Д.Н. Кугушев и др. // 27.10.2009, Бюл. №30.

10. Патент РФ (полезная модель) № 123226. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК H01J 61/02 / С.В. Гавриш, Т.Н. Барина, Д.Н. Кугушев и др. // 20.12.2012, Бюл. №35.

11. Патент РФ (полезная модель) № 123226. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК H01J 61/02 / С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, Т.В. Игнатова и др. // 20.12.2012, Бюл. №35.

Основные конференции:

1. С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев, С.В. Пучнина, Р.М. Ушаков. Индикатриса излучения импульсного источника УФ-излучения с U-образной конфигурацией плазменного канала. // VII Международ. конф. «Лазерные, плазменные исследования и технологии «ЛаПлаз – 2021» / Сб. науч. трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2021. – С. 204-205.
2. Градов В.М., Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю. Моделирование мощных импульсных разрядов с широкодиапазонным спектральным составом излучения // IV Международ. научно-практическая конфер. «САПР и моделирование в современной электронике» / Сб. науч. трудов. – Брянск, 2020. – С. 354 -357.
3. Математическое моделирование импульсных источников УФ-излучения с разрядами в ксеноне и криптоне, стабилизированных излучающе - поглощающей оболочкой / Градов В.М., Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., и др. // Международная научно-техническая конференция. "Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики" / Сб. науч. трудов. – Воронеж, 2020. – С. 797- 801.
4. Гавриш С.В., Кугушев Д.Н., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В. Изменение оптических свойств легированных кварцевых оболочек импульсных ламп под воздействием излучения ксеноновой плазмы //X международ. Конф. по фотонике и информационной оптике / Сборник научных трудов. М.: НИЯУ МИФИ, 2021. - С. 309-310
5. Оптические свойства сапфира и кварцевого стекла в условиях воздействия импульсного излучения газоразрядной плазмы / С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев, С.В. Пучнина // Тез. докл. Международ. Конф. «Инженерные системы – 2020». / Сб. науч. трудов. – М.; РУДН, 2020. - С. 51 – 57.
6. Структурные исследования переходных слоев при пайке медным припоем сапфира с коваром /С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, Д.Ю. Пугачев, С.В. Пучнина // Сборник научных трудов Международ. Конф. «Перспективные материалы конструкционного и функционального назначения». - Томск, 2020. - С.22-23.
7. Радиационное воздействие ультрафиолетового излучения на сапфировые оболочки/ С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, М.А. Левкин и др.// Радиационная стойкость электронных систем- «Стойкость - 2010». Научно - технический сборник - М.: МИФИ, 2010.-С. 127- 128.