Филиал акционерного общества "Стелла - К"

На правах рукописи

Sclorf

Логинов Владимир Владимирович

«ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНОГО ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИСТОЧНИКА ИК ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОВЫШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЛЯ ОПТИКО – ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ»

Специальность 05.27.02 - «Вакуумная и плазменная электроника»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

Доктор технических наук

Гавриш С.В.

Москва - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ5
ГЛАВА 1. РАСЧЕТНО – ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ,
ОПРЕДЕЛЯЩИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДА
В ПАРАХ МЕТАЛЛОВ
1.1. Физические основы излучения разряда в парах щелочных металлов14
1.2. Обзор методов управления параметрами излучения ламп с разрядом в
парах металлов постоянного и переменного тока
1.3. Особенности конструкция импульсной лампы с разрядом
в парах цезий – ртуть – ксеноновой смеси
1.4. Математическое моделирование и расчетные исследования
характеристик импульсных ламп с разрядом в парах металлов32
1.4.1. Математические модели теплофизических и плазменных
процессов в газоразрядных лампах
1.4.2.Состав многокомпонентной плазмы разряда в парах
щелочных металлов
1.4.3. Алгоритм реализации математической модели
1.4.4. Результаты расчета предельных характеристик излучения
импульсного разряда в цезий – ртуть – ксеноновой смеси
1.5. Обобщенный анализ факторов, влияющих на параметры
излучения импульсно – периодического разряда.
Формирование направлений исследований59
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНО – ПЕРИОДИЧЕСКОГО
РАЗРЯДА В СМЕСИ ПАРОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ61
2.1. Экспериментальные установки и методики исследований
электрических параметров и характеристик излучения
импульсных газоразрядных ламп61
2.1.1. Экспериментальные источники питания газоразрядных ламп
с разрядом в парах щелочных металлов61

2.1.2. Методики исследования характеристик излучения
импульсного разряда в парах щелочных металл67
2.1.3. Методика исследования теплового состояния импульсной
лампы с разрядом в парах щелочных металлов
2.2. Термодинамический анализ разряда в парах сплавов цезия
с ртутью, рубидием и калием71
2.2.1. Давление паров и теплопроводность паров щелочных металлов
над сплавами с ртутью75
2.2.2. Давление паров и теплопроводность паров цезия над сплавами
с рубидием и с калием76
2.3. Спектрально – энергетические исследования импульсно –
периодического разряда в парах компонентов сплавов щелочных металлов79
ГЛАВА З. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ
ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП С РАЗРЯДОМ В ПАРАХ
ЦЕЗИЙ - РУБИДИЕВОЙ СМЕСИ90
3.1. Особенности конструкции и технологическая схема
изготовления разрабатываемой лампы91
3.2. Разработка конструкции электродных узлов лампы с импульсно –
периодическим разрядом в цезий - рубидиевых парах
3.2.1. Конструкция анодного узла95
3.2.2. Конструкция катодного узла97
3.3. Герметичное соединение электродных узлов с сапфировой оболочкой99
3.4. Разработка технологии откачки, наполнения и герметизации
разрядного объема лампы103
3.4.1. Разработка герметизирующего узла и технологической
последовательности откачки и наполнения разрядной трубки103
3.4.2. Расчетная методика определения массы компонентов
при наполнении газоразрядных ламп105
3.4.3 Разработка способа герметизации разрядного объема

газоразрядных ламп107
3.5. Разработка конструкции и технологии изготовления
внешней оболочкии центрирующей арматуры114
3.5.1. Конструкция и технология токоввода внешней оболочки
газоразрядной лампы115
3.5.2. Особенности конструкции центрирующей арматуры
внешней колбы119
ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННЫХ ЛАМП124
4.1. Характеристики излучения газоразрядной лампы
в различных режимах электрического питания124
4.1.1. Влияние на параметры излучения длительности импульса
напряжения124
4.1.2. Влияние на параметры излучения пикового значения напряжения127
4.2. Модуляционные характеристики разработанной лампы129
4.3. Сравнение разработанной лампы с отечественным аналогом131
4.4. Исследование надежности разработанной лампы СП4-1500133
4.5. Стабилизация параметров разряда при изменении
пространственного положения газоразрядной лампы136
4.5.1. Анализ теплофизических процессов в плазме смеси металлов
при изменении пространственного положения газоразрядной лампы136
4.5.2. Стабилизация параметров излучения газоразрядной
лампы посредством двухполярного электрического питания138
4.5.2.1. Расчетно – теоретическое обоснование стабилизации
параметров лампы за счет двухполярных импульсов напряжения139
4.5.2.2. Экспериментальное исследование стабилизации
параметров излучения двухполярным питанием лампы140
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ143
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК145
Приложения155

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В настоящее время одним из приоритетных направлений развития импульсных (модулируемых) источников ИК излучения (газоразрядных ламп) является их применение в качестве основного функционального элемента оптико - электронных систем (ОЭС), предназначенных для защиты летательных аппаратов (ЛА) от поражающего воздействия управляемых ракет с тепловыми головками самонаведения (ГСН) [1].

Основным требованием, предъявляемым к газоразрядной лампе является обеспечение высокой интенсивности амплитудно - модулированного ИК излучения в спектральной области максимальной чувствительности приемных устройств ГСН: 2-5 мкм (диапазон 1) и 3-5 мкм (диапазон 2) [2, 3]. В настоящее время в России создано новое поколение импульсных газоразрядных источников ИК излучения, удовлетворяющее перечисленным эксплуатационным характеристикам оптико-электронных систем для защиты ЛА [4]. Газоразрядная лампа в ОЭС представляет собой разрядную трубку (горелку) из монокристаллического оксида алюминия (сапфира, корунда), наполненную цезий - ртуть - ксеноновой смесью, которая коаксиально размещена относительно внешней термостатирующей сапфировой оболочке, заполненной газом-теплоносителем. Горелка лампы работает в импульсном или импульсно - периодическом режимах генерации некогерентного ИК излучения. Данная конструкция разрядного источника ИК излучения обеспечивает высокие удельные электрические мощности за счет теплосъема посредством направленного на наружную оболочку потока воздуха [5]. Основными характеристиками излучения в спектральных диапазонах 1 и 2 такой газоразрядной лампы являются пиковая сила излучения (I), постоянная составляющая (I_n), длительность импульса ($t_{0,5}$) и глубина модуляции, рассчитываемая по формуле: m = [I - I] I_n/I 100% [1, 4-6]. В настоящее время описанные отечественные образцы импульсных источников ИК излучения позволяют достичь пиковой силы излучения 70 Вт/ср при удельной электрической мощности $P_{v\partial} = 800$ Вт/см [1, 4], в то время как у серийной лампы СП2-1500 в процессе эксплуатации в составе ОЭС при Р_{уд}=

430 Вт/см пиковая сила излучения не превышает 40 Вт/ср. Поэтому проблема повышения эффективности импульсного источника ИК излучения для серийной ОЭС при сохранении энергопотребления газоразрядной лампы **является актуальной и приоритетной**. Одновременно, **практическую значимость** приобретает вопрос исключения из состава наполнения разрядного объема лампы ртути и, тем самым, создание экологически чистого газоразрядного источника модулируемого ИК излучения.

Проведенный патентный и информационный анализ не выявил сведений о новых конструктивных решениях источников ИК излучения с импульсно периодическим разрядом в парах других плазмообразующих сред. Введение новых компонентов в состав наполнения разрядного объема горелки приведет к изменению ее теплофизического состояния и характеристик ИК излучения газоразрядной лампы в целом [7,8]. Поэтому возникает задача проведения исследований процессов в плазме и оболочках лампы во взаимосвязи с режимами электрического питания, параметрами принудительного охлаждения, особенностями конструкции и эксплуатации газоразрядной лампы в составе ОЭС.

Целью диссертационной работы является исследование и разработка источника ИК излучения с импульсно — периодическим разрядом в смеси паров щелочных металлов, обеспечивающих повышенные эксплуатационные параметры для ОЭС.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе анализа отечественной и зарубежной научно – технической литературы определить основные параметры, определяющие характеристики излучения импульсных ламп с разрядом в парах щелочных металлов. Выполнить расчетные исследования импульсного разряда в парах цезий-ртуть-ксеноновой смеси, направленные на выявление предельных характеристик ИК излучения серийных газоразрядных ламп при удельной электрической мощности $P_{y0} = 430$ Вт/см.

2. Разработать универсальные источники электрического питания и методики исследования электрических, спектральных и энергетических характеристик ИК излучения.

3. Экспериментально исследовать импульсно – периодический разряд с новыми составами плазмообразующей среды и выявить параметры, влияющие на спектрально - энергетические и модуляционные характеристики ИК излучения газоразрядных ламп.

4. Разработать конструктивное исполнение газоразрядного источника ИК излучения для ОЭС.

5. Исследовать физические и химические процессы, происходящие в материалах элементов конструкции при изготовлении и эксплуатации газоразрядной лампы. Разработать рекомендации по созданию технологии серийного производства газоразрядных ламп с разработанным составом наполнения разрядного объема.

6. Оптимизировать характеристики разработанной лампы на соответствие эксплуатационным требованиям, предъявляемым к ОЭС.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что впервые:

1. Разработана приближении локального термодинамического равновесия математическая модель трехкомпонентной слабонеидельной цезий – ртуть – ксеноновой плазмы с уровнем температур (3-10)·10³К и давлениями (0,1 – 0,4) МПа, ограниченной системой из двух сапфировых оболочек, описывающая теплофизические и плазменные процессы в газоразрядном источнике ИК излучения при работе в импульсно – периодическом режиме.

2. Получены расчетным путем получены температурные поля разрядной сапфировой оболочки, зависимости пиковой силы и глубины модуляции в спектральных диапазонах 1 и 2 от электрической мощности разряда.

3. Определен на основе термодинамического анализа оптимальный состав плазмообразующей среды газоразрядной лампы, который обеспечивается заменой ртути на рубидий в количестве не превышающем 25 вес.% от суммарной массы металлов.

4. Впервые представлены результаты экспериментального исследования влияния введения в цезиевый импульсно – периодический разряд добавок калия и рубидия, выполнено сравнение указанных разрядов и доказано увеличение пиковой силы излучения не менее чем в 1,3 раза при добавлении в цезиевую плазму рубидия.

5. Предложены методики расчета конструкции электродов, построенные на анализе тепловых потоков из плазмы и собственного нагрева проходящим током. Представлены результаты исследований физических и химических процессов в материалах конструкции при пайке стеклокерамическим (рекристаллизация ниобия, рост кристаллической фазы алюмината кальция и т.д.) и медным припоем, при откачке и герметизации разрядного объема (появления второй фазы в расплаве никелида титана).

6. Впервые предложен режим импульсно – периодического электрического питания газоразрядной лампы, позволяющий исключить явление конвекции плазмообразующей среды за счет изменения полярности каждой серии импульсов напряжения на противоположную по отношению к предыдущей.

Научная значимость работы состоит в том, что комплекс представленных результатов, научных положений и выводов диссертационной работы, полученных при исследовании импульсного разряда в цезий – рубидий – ксеноновой смеси, ограниченного системой из двух монокристаллических сапфировых оболочек, способствует выявлению новых знаний в области разряда в парах щелочных металлов и служит базой для проектирования других типов газоразрядных источников некогерентного излучения в широком оптическом диапазоне, предназначенных для использования в гражданской и военной технике.

Практическая значимость работы. Полученные экспериментальные и расчетные результаты проведенных в диссертации исследований позволили впервые в России приступить к опытному выпуску ламп СП4-1500 (ТУ 6364-008-77534031-2016) с двумя оболочками из искусственного сапфира с плазмообразующей средой на основе цезий – рубидий – ксеноновой смеси, предназначенных для использования в составе модернизированной СОЭП Л370-5. Предложенные

8

конструктивные решения и состав наполнения позволили создать экологически чистую газоразрядную лампу для ОЭС. В диссертации приведены Акты об использовании результатов исследований в производстве ламп в АО «СКБ «ЗЕНИТ» (г. Москва), изделий, разработанных в ФГУП «Экран» (г. Самара), и освоенных в опытном производстве филиала АО «Стелла - К» (г. Зеленоград).

Полученные результаты, разработанные конструктивные решения и технологические процессы могут быть использованы при создании других газоразрядных приборов, например, ламп накачки лазеров в квантовой электронике, ячеек для стандартов частоты в приборах связи, УФ источников медицинского назначения и т.д.

Методы исследований. При выполнении экспериментальных исследований применялись известные и специально разработанные методики и аппаратура: для электрических (делитель напряжения 1:1000, трансформатор тока LT 10000-S, киловольтметр С 511, нановольтметр B2-38), осциллографических (осциллографы С9-8, DS1052 E), фотометрических (фотометр Ф-005, УФ - радиометр ТКА -ПКМ, преобразователи излучения на базе ФД - 119, ФСГ -22), спектрометрических (монохроматоры МДР-23, МДР-204, спектрофотометр СФ-2000, ИК - Фурье спектрометр ФСМ-1201), пирометрических (термоэлемент РТН - 10С, измеритель мощности лазерного излучения ИМО - 2H, тепловизионная система SDS HotFind-LXT) измерений параметров импульсного газоразрядного источника излучения. Все исследования характеристик проводились на специально созданных экспериментальных стендах с помощью стандартной аппаратуры или специально разработанных приборов и приспособлений.

Для исследования структуры и свойств конструкционных материалов использовались следующие методы: поляризационная микроскопия (микроскопы МПС-1 и полярископ - поляриметр ПКС-250), растровая электронная микроскопия (электронный микроскоп JEOL JSM-6490LV), рентгеноструктурный анализ (микроанализатор CAMECA, рентгенофлуоресцентный анализатор FISCHER-SCOPE X-RAY), метод индентирования (микротвердомер ПМТ-3). Часть исследований проводились по методикам и на экспериментальной базе научно - исследовательских институтов ФГУП «НИИП», АО «НИИ «Элпа», АО «НИИ «Экран», ФТИ им. А.Ф Иоффе РАН при непосредственном участии в экспериментах автора диссертации.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что увеличение пиковой силы излучения импульсного источника ИК излучения достигается введением в состав плазмообразующей среды на основе паров цезия добавки рубидия в количестве не более 25 вес% от суммарной массы металлов в разряде.

2. Показано, что в лампах с цезий–рубидий–ксеноновым импульснопериодическим разрядом в спектральном диапазоне 3-5 мкм достигнута пиковая сила излучения не менее 50 Вт/ср с глубиной модуляции до 97% при удельной электрической мощности разряда 430 Вт/см, что позволяет обеспечить максимальную эффективность противодействия головкам самонаведения.

3. Выявлено, что при мгновенном изменении пространственного положения импульсного источника ИК излучения с разрядом в цезий – рубидий – ксеноновой смеси стабилизация параметров лампы достигается использованием импульсно – периодической структуры электрического питания, в которой каждая последующая серия импульсов напряжения изменяет свою полярность на противоположную по отношению к предыдущей.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечивается использованием комплекса современных физических и химических методов исследования, взаимодополняющих экспериментальных методик, многократной воспроизводимостью экспериментов, применением современных методов анализа и обработки результатов измерений, удовлетворительным совпадением результатов математического моделирования и экспериментов, сопоставимостью полученных результатов с данными других авторов, а также практической проверкой сформированных научных выводов и эксплуатационных рекомендаций при эксплуатации разработанных газоразрядных источников ИК излучения в серийно выпускаемых бортовых комплексах обороны.

Сформулированные в диссертационной работе научные положения и выводы непротиворечивы и согласуются с общепризнанными физическими положениями, результатами теоретических расчетов и экспериментов, представленных в многочисленных литературных источниках по тематике газового разряда, материаловедения и метрологии.

Личный вклад автора. В экспериментальных работах личный вклад автора заключается в постановке задач, руководстве исследованиями и в непосредственном выполнении, анализе полученных результатов, разработке методик испытаний и основных конструктивных решений, используемых в макетных и серийных образцах разрядных источников ИК излучения.

При выполнении расчетных исследований личное участие автора диссертации заключалось в непосредственном выполнении расчетов, проведении численных экспериментов по разработанным программам, анализе адекватности математической модели, корректировке расчетных схем и интерпретации полученных результатов.

Автор принял непосредственное участие в подавляющем большинстве проведенных экспериментов, а также в подготовке научных публикаций и докладов. В итоге автор внес решающий вклад в разработку вопросов, рассматриваемых в диссертационной работе. 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 V Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии «ЛаПлаз – 2019», Международной конференция «XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности (г. Санкт - Петербург, 2018 г.), VIII Международном симпозиуме по радиационной плазмодинамике (г. Москва, 2009 г.), Международных конференциях «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения» (г. Москва, 2008, 2011, 2013г.), 13 и 14 Международных научно - практических конференциях «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике» (г. Санкт – Петербург, 2011, 2012г.), Всероссийских конференциях «Радиационная стойкость электронных систем» (г. Лыткарино, 2008, 2011, 2012 г.), на 11 научных семинарах и совещаниях в АО «СКБ «ЗЕ-НИТ», АО «Стелла – К», АО «НИИ «Экран», АО «НПО «БКО», ФТИ им. А.Ф Иоффе РАН.

ГЛАВА 1. РАСЧЕТНО – ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЩИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ РАЗРЯДА В ПАРАХ МЕТАЛЛОВ

В настоящее время в оптоэлектронных системах, предназначенных для формирования в фотоприемных устройствах следящих систем структурированной информации путем воздействия помехового оптического излучения, широко используются импульсные лампы с разрядом в цезий – ртуть – ксеноновой смеси [1, 4, 6]. Потери энергии системы источник излучения – фотоприемное устройство будут наименьшими, если спектр излучения первого согласован со спектром поглощения второго [3]. Следовательно, создание ориентированного под определенные задачи селективного излучателя позволит существенно повысить КПД оптико-электронных систем. Как известно, от газоразрядного источника избирательный спектр можно получить лишь в случае преобладания излучения возбужденных атомов, т.е. связано - связанных переходов [9]. Создание такого излучателя возможно только в условиях низкотемпературной плазмы при сравнительно невысокой удельной электрической мощности и низкой плотности тока. При высоких электрических мощностях, характерных для мощных импульсных источников излучения, плотность тока и температура плазмы велики (до 5-6 кA/см² и до 10000 - 12000°К), поэтому в испускаемой плазмой энергии преобладает излучение рекомбинационно - тормозного характера, имеющее равномерное распределение энергии по спектру в широком диапазоне длин волн [10].

Широко используемые в настоящее время импульсные ксеноновые лампы излучают (в области прозрачности кварца 0,2 - 4 мкм) приблизительно 50%, а лампы непрерывного горения не более – 40%, подведенной к ним электрической энергии [10]. По-видимому, в дальнейшем более высокой эффективности от ксенонового разряда ожидать не следует. Поэтому в условиях высоких удельных мощностей разряда трудно получить спектр с заметной селективностью (на основе излучения, формируемого при связно-связанных переходах). Для повышения эффективности мощных источников излучения можно наметить путь увеличения селективности источника за счет введения в разрядный объем газоразрядной лампы добавок различных газов или паров, прежде всего щелочных металлов, обладающих низким потенциалом ионизации и позволяющих повысить роль линейчатого излучения.

1.1. Физические основы излучения разряда в парах щелочных металлов

Рассмотрим спектральные характеристики излучения разряда в парах щелочных металлов. Как известно, атомы щелочных металлов характеризуются водородоподобной системой расположения термов, линии образуют ряд серий, расположение которых в шкале длин волн зависит от атомного номера элемента (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.1

Элемент	Li	Na	K	Rb	Cs
Главная	$2S \rightarrow nP$	$3S \rightarrow nP$	$4S \rightarrow nP$	$5S \rightarrow nP$	$6S \rightarrow nP$
серия	<i>n</i> =2, 3, …				
Резкая	$2P \rightarrow nS$	$3P \rightarrow nS$	$4P \rightarrow nS$	$5P \rightarrow nS$	6P-nS
серия	<i>n</i> =3, 4,	<i>n</i> =4, 5, …	<i>n</i> =5, 6, …	<i>n</i> =6, 7,	<i>n</i> =7, 8,
Диффузная	$2P \rightarrow nD$	$3P \rightarrow nD$	$4P \rightarrow nD$	$5P \rightarrow nD$	6P-nD
серия	<i>n</i> =2, 3, …	<i>n</i> =3, 4, …	<i>n</i> =3, 4, …	<i>n</i> =4, 5,	<i>n</i> =4, 5,
Серия	$3D \rightarrow nF$	$3D \rightarrow nF$	$3D \rightarrow nF$	$4D \rightarrow nF$	5D-nF
Бергмана	<i>n</i> =4, 5,	<i>n</i> =4, 5,	<i>n</i> =4, 5,	<i>n</i> =3, 4, …	<i>n</i> =4, 5,

Основные серии щелочных металлов

Ограничиваясь случаем термодинамического равновесия, интенсивность спектральной линии, изучаемой в единице объёма при постоянной температуре, можно представить в виде [9]:

$$I_{ki} = N_k A_{ki} h v_{ki} \tag{1.1}$$

где I_{ki} - интенсивность линии с частотой, N_k - концентрация возбуждаемых атомов на уровне k, v_{ki} - вероятность перехода $k \rightarrow i$

Учитывая, что концентрация атомов в каждом состоянии соответствуют распределению Больцмана, то имеем следующее выражение:

$$N_{k} = \frac{g_{k}}{g_{i}} N_{i} e^{-\frac{W_{k} - W_{i}}{kT}}$$
(1.2)

где N_i - концентрация атомов в состоянии *i*, W_k , W_i - энергии, соответствующие состояниям *k* и *i*; g_k и g_i –статические веса состояний.

Для вероятности перехода $k \rightarrow i$ имеет место соотношение:

$$A_{ki} = 0,67 \cdot \frac{g_i}{g_k} \cdot \frac{1}{\lambda_{ik}^2} \cdot f_{ik}$$
(1.3)

где λ_{ik} - длина волны, соответствующая v_{ki} ; f_{ik} - сила осциллятора.

Подставляя выражение (1.3) и (1.2) в (1.1), получим:

$$I_{ki} = 0.67 N_i e^{-\frac{W_k - W_i}{kT}} \cdot \frac{1}{\lambda_{ik}^2} \cdot f_{ik}$$
(1.4)

Из выражения (1.4) следует, что интенсивность линий резко убывает с увеличением энергии терма k, так как экспоненциальный множитель и сила осциллятора быстро уменьшаются. Так для щелочных металлов (*Na, K, Rb* и *Cs*) при переходе от первого (резонансного) ко второму дублету величина f_{ik} уменьшается почти на два порядка и далее падает монотонно. Исключение составляет литий, у которого сила осциллятора для третьего дублета выше, чем для второго, а в остальном характер изменения силы осциллятора аналогичен другим щелочным металлам.

Из выражения (1.4) следует, что наибольшей интенсивностью обладают резонансный дублет щелочного металла и головные дублеты других серий, но их



a)



б)



Рисунок 1.1. Схема уровней атомов натрия (а), калия (б), рубидия (в) и цезия (г). [11]

интенсивность из-за значительно меньших сил осцилляторов меньше интенсивности резонансного дублета. На рисунке 1.1 приведены системы термов [11], а в таблице 1.2 некоторые характеристики щелочных металлов [9]. Из приведённых данных хорошо видно, что с возрастанием атомного номера резонансное излучение имеет тенденцию смещаться в сторону больших длин волн. Исключение из этого правила представляет лишь натрий, для которого $\lambda_{pes Na}$ меньше $\lambda_{pes Li}$.

Таблица 1.2

Спектральные характеристики нейтральных атомов щелочных металлов и ртути.

Элемент	Потенциал ионизации, В	Потенциалы воз- буждения резонанс- ных уровней, В	Длины волн резонансных	Переходы
Na	5,14	2,09	589,59	${}^{2}P_{1/2} \rightarrow {}^{1}S_{1/2}$
			589,99	${}^{2}P_{3/2} \rightarrow {}^{2}S_{1/2}$
K	4,34	1,61	769,90	${}^{2}P_{1/2} \rightarrow {}^{1}S_{1/2}$
		1,62	764,49	${}^{2}P_{3/2} \rightarrow {}^{2}S_{1/2}$
Rb	4,18	1,56	794,76	${}^{2}P_{1/2} \rightarrow {}^{1}S_{1/2}$
		1,59	780,03	${}^{2}P_{3/2} \rightarrow {}^{2}S_{1/2}$
Cs	3,89	1,39	894,35	${}^{2}P_{1/2} \rightarrow {}^{1}S_{1/2}$
		1,45	852,11	${}^{2}P_{3/2} \rightarrow {}^{2}S_{1/2}$
Hg	10,39	4,89	253,65	$2\mathbf{S}_{1}$, \mathbf{D}_{2}
		6,71	184,95	$\mathfrak{S}_{1/2} \rightarrow \mathfrak{F}_{3/2}$

В силу того, что натриевый резонансный дублет ближе к максимуму чувствительности глаза, чем соответствующие дублеты остальных щелочных металлов, разряд должен обеспечивать наибольшую светоотдачу. Это утверждение остаётся справедливым для ряда наиболее интенсивных линий щелочных металлов, т.к. все они, кроме линий лития, сдвинуты в сторону больших длин волн по сравнению с аналогичными линиями натрия.

В ультрафиолетовой области спектра мощность излучения атомов щелочных металлов низка, так как здесь, кроме линий высоких порядков главной серии, практически отсутствует излучение. Самые мощные коротковолновые линии излучает литий с длинами волн соответственно $\lambda = 323,2$ нм и $\lambda = 330,2$ нм, но их доля энергии в энергетическом балансе излучения паров лития мала, что следует непосредственно из выражения (1.4). Учитывая сказанное, становится очевидным нецелесообразность использования разряда в парах щелочных металлов для получения источников с преимущественным излучением в ультрафиолетовой области спектра.

Особый интерес может представлять собой излучение разряда в парах щелочных металлов в инфракрасной области спектра. Как уже указывалось выше, для всех щелочных металлов, стоящих за калием в периодической системе Менделеева, резонансное излучение лежит в этой области спектра (таблица 1.2).

В работе К. Шмидта [12] были исследованы спектральное распределение излучения разряда в парах Na, K, Rb и Cs в зависимости от давления паров в диапазоне давлений от 30 до 1000 мм. рт. ст. (см. рисунок 1.2). В качестве материала оболочки использована трубка из поликристаллической окиси алюминия (поликора), что позволяло осуществлять разряд в парах чистых щелочных металлов при высокой температуре и давлении. Коэффициент пропускания поликора в видимой области по данным [12] составлял более 90% при толщине стенки 0,75 мм. Для обеспечения зажигания разряда в лампу добавлялось около 20 мм. рт. ст. ксенона. Давление паров в разряде регулировалось варьированием с последующим термостатированием наиболее холодной точки лампы, где находился избыток щелочного металла в жидкой фазе.

Из приведенных данных следует, что в спектре излучения всех щелочных металлов возникает и с ростом давления паров p_{M} быстро увеличивается самопоглощение резонансных линий. Наблюдаемое на рисунке 1.2 по мере роста p_{M} ассиметричное уширение больше смещается в длинноволновую область спектра и происходит перераспределение энергии излучения в длинноволновую область за счёт сильного роста излучения в районе длин волн от 900 до 1600 нм.



Рисунок 1.2 Спектры излучения натриевой (а), калиевой (б), рубидиевой (в) и цезиевой (г) ламп постоянного тока при давлении паров 30 (1), 240 (2), 540 (3) и 1000 (4) мм. рт. ст. [14]



Рисунок 1.3. Спектры излучения импульсных цезиевой (а), рубидиевой (б), натрий – рубидиевой (в) и цезий – рубидиевых (г) ламп. [13, 14]

19

На рисунке 1.3 (а - г) приведены полученные Дж. Гриденом спектральные характеристики некоторых из рассмотренных щелочных металлов и смесей между собой при импульсном режиме работы разрядного источника [13, 14].

Как видно из приведенных результатов при переходе к импульсному режиму работы происходит трансформация спектральных характеристик, а именно, увеличивается мощность континуума в видимом диапазоне и возрастает уширение линий. При разряде в смеси нескольких щелочных металлов в спектре будет преобладать излучение наиболее тяжелого компонента, имеющего наименьший потенциал ионизации (таблицу 1.2). Подробно данное явление будет рассмотрено ниже.

Оценивая вышеприведённые материалы, можно сделать следующие основные выводы:

1. Наиболее интересным с точки зрения разработки источников света является разряд в парах натрия, так как длина волны резонансного дублета близка к области максимальной чувствительности человеческого глаза. При низких давлениях паров (до нескольких мм. рт. ст.) и малых плотностях тока почти вся энергия излучается в этом резонансном дублете. При этом можно получить светоотдачу до 140 лм/Вт при низкой цветопередаче. При высоких давлениях и плотностях тока, как видно из рисунка 1.2, значительная доля всей энергии излучается по обе стороны от резонансного дублета с ассиметричным уширением в «красную» область спектра. На коротковолновую часть спектра падает небольшая доля от общей излучаемой энергии.

2. Разряды в парах *K*, *Rb* и *Cs* малоэффективны для освещения (световая отдача максимальная для калия составляет 10 лм/Вт, рубидия 31 лм/Вт и цезия 35 лм/Вт. В тоже время К. Шмидт в своей работе указывает на неплохое согласование спектра поглощения стекла с неодимом и спектра излучения калиевого разряда. Необходимо отметить, что с увеличением давления паров у более тяжёлых элементов (*Rb* и *Cs*) наблюдается все возрастающее рекомбинационное излучение в инфракрасной области спектра, что для эффективной накачки нельзя считать положительным фактором, так как почти вся энергия спектрального диапазона 1,0

20

– 1,6 мкм не может быть эффективно использована для известных активных лазерных сред. Поэтому разряды в парах высокого давления (P>500 мм рт. ст.) *К, Rb* и *Cs* следует считать малоэффективными для накачки ОКГ, но в то же время это явление может быть применено для систем противодействия в ближнем ИК диапазоне.

1.2. Обзор методов управления параметрами излучения ламп с разрядом в парах металлов постоянного и переменного тока

Создание в начале 60-х годов натриевых ламп высокого давления (НЛВД) в колбах из поликристаллической окиси алюминия явилось одним из наиболее значительных событий в области развития источников излучения [9]. Это явление ознаменовалось широкомасштабными расчетными и экспериментальными исследованиями теплофизических и плазменных процессов в разряде парогазовой смеси натрий – ртуть – ксенон [9, 15, 16]. Поэтому основное внимание в дальнейшем изложении будет сосредоточено на изучении результатов исследований НЛВД.

В настоящее время натриевые лампы являются самыми эффективными источниками света, обладающими высокой световой отдачей, большим сроком службы, высокой стабильностью и надежностью. Подробно конструкция НЛВД рассмотрена в ряде монографий [9, 15, 16] и диссертационных работ [14 - 15]. В данном разделе мы остановимся только на самых значительных факторах, позволяющих регулировать параметры излучения НЛВД.

Краткая характеристика натриевой лампы высокого давления. Натрий, имеющий наиболее низкие потенциалы возбуждения и ионизации, является основным рабочим веществом.

Ртуть вводится в качестве буферного газа для повышения градиента потенциала в столбе разряда и для снижения тепловых потерь. Вклад в излучение этот компонент практически не дает [9, 15]. Рабочее давление паров натрия 4 - 14 кПа, соотношение давлений паров натрия и ртути от 1:10 до 1:20. Ксенон, как зажигающий газ, вводится при холодном давлении 2,5 кПа. Напряжение зажигания ламп с ксеноном при указанном давлении 2 - 4 кВ. Введение ксенона повышает также световую отдачу за счет снижения теплопроводности плазмы.

Как отмечалось выше, спектр излучения НЛВД в видимой области состоит из сильно уширенных D - линий натрия с сильным самообращением, а также интенсивных линий в сине-зеленой части спектра. Цвет излучения имеет приятный золотисто-белый оттенок, $T_{us} = 2100$ К, координаты цветности Х \approx 0,510; У \approx 0,410; общий индекс цветопередачи $R_a \approx 20$. Световая отдача ламп различной мощности изменяется в пределах от 90 до 130 лм/Вт [9, 15].

Баланс мощности НЛВД состоит из следующих компонентов: потери на электродах 6%, видимое излучение 30%, УФ и ИК излучение 20%, тепловые потери в столбе разряда 44% [15]. В желто-оранжевой области спектра (560-610 нм) сосредоточено 70% видимого излучения.

Влияние конструкции на характеристики излучения НЛВД. Большинство зарубежных публикаций представляют собой, в основном, описание характеристик ламп для потенциальных потребителей и почти не содержало информации о фактически проходящих процессах в разряде и методах математического моделирования и инженерного расчета ламп. В первых работах Гридена [13] опубликованы данные исследования по радиальному распределению яркости дуги натриевых ламп, а у Ловке [15] рассчитаны температурные профили натриевой дуги высокого давления.

Существенный вклад в исследования НЛВД и разработку инженерных методов их расчета внесены советскими учеными Рохлиным Г.Н., Волковой Е.Б. [9, 17, 19 - 21]. Ими установлены зависимости световых и электрических характеристик натриевого разряда от состава амальгамы, температуры конденсата, величины разрядного тока, диаметра разрядной трубки. В [9, 21] разработаны инженерные методы расчета натриевых ламп, исходя из которых при создании натриевых ламп ВД с высокими световыми отдачами (η_v) необходимо выбирать их параметры следующим образом [21]:

- амальгама с атомным содержанием натрия в диапазоне 0,6-0,85 ат. долей;
- температура амальгамы (температура холодной точки горелки) 640-680°С;
- сила тока наибольшая из возможных для данной мощности;

• диаметр разрядной трубки – наименьший из возможных для данной мощности, применение которого сможет обеспечить необходимый тепловой режим;

• длина светящейся части горелки (*l*_{*c*⁶}) максимально возможная;

• напряжение на лампе (*U*_Л) максимально возможное, при котором лампа будет устойчиво работать в сети с учетом повышения его в процессе срока службы.

Следует отметить, что разработанные методы приемлемы в широком диапазоне электрических мощностей ламп. Для маломощных НЛВД ($P_n \le 150$ BT), где существенную роль начинают играть концевые потери тепла в горелках, требуется проведение дополнительных исследований и уточнение расчетов в части составления и решения уравнений теплового баланса. Для ламп средней мощности (P_n более 150 BT) существует ряд интересных работ по исследованию процессов в НЛВД и выявлению путей их совершенствования. Так в [22 - 24] проводится анализ факторов, влияющих на η_v НЛВД. Исходя из того, что излучение натриевых ламп в ВД и ИК-области спектра составляет 32%, тепловой поток через стенки горелки – 34%, а излучение D-дуплета Na – 25%, повышение η_v возможно за счет уменьшения теплового потока с переводом энергии в видимое излучение.

Расчетными и экспериментальными исследованиями показано, что факторами, влияющими на перераспределение энергии между составляющими энергетического баланса, являются диаметр разрядной трубки, температура ее стенок и температура разряда. Взаимосвязь этих факторов требует их оптимального выбора. В [21] приведены данные по исследованию влияния ксенона как наполняющего газа на дуговой разряд НЛВД. Исследования проводились на лампах мощностью 360 Вт с горелками с сапфировыми трубками внутренним диаметром 8 мм. В работе показано, что увеличение давления Хе приводит к изменению радиального распределения температуры в дуге, обуславливает расширение D-линии Na и улучшает индекс цветопередачи $Ra \sim$ на 10% (для увеличения давления Xe с 20 до 300 мм рт.ст.). Это увеличение давления Хе увеличивает также напряжение на единицу длины разрядного промежутка с 11,37 до 13,5 В/см. В [22] изучались характеристики НЛВД мощностью до 450 Вт с поликоровыми трубками внутренним диаметром от 4 до 13,5 мм. При этом температура холодной точки изменялась в интервале температур 60-800⁰С.

Показано, что с увеличением внутреннего диаметра трубки и давления паров натрия улучшается индекс цветопередачи лампы. Световая отдача с увеличением внутреннего диаметра при постоянной мощности снижается. При постоянной мощности на единицу длины горелки (Вт/см) световая отдача почти не зависит от диаметра горелки, так как с увеличением удельной мощности (P_I) происходит увеличение η_v .

В составе наполнения НЛВД всегда образовывается жидкая фаза амальгамы натрия, расположенная в самой холодной точке (х.т.) лампы [9]. В результате истинное давление паров ртути и натрия над амальгамой снижается по сравнению с давлением чистых металлов при той же температуре $T_{x.m.}$ [9, 17, 19, 25]. В качестве примера на рисунке 1.4 приведены зависимости давление паров натрия и ртути над амальгамой, построенные по данным работы [25].



Рисунок 1.4. Давление насыщенных паров компонентов над амальгамой натрия по данным работы. [25]

На основании этих исследований по определению парциальных давлений паров натрия p_{Na} и ртути p_{Hg} (рисунок 1.4) как функции состава и температуры амальгамы установлена необходимость вводить в лампу избыточное количество обоих компонентов в виде амальгамы с содержанием 0,5-0,9 атомных долей натрия, что обеспечивает при температурах амальгамы 600-950°C давление паров натрия в пределах 10-1000 мм рт. ст., а ртути от 0,1 до 5атм. (рисунок 1.4). При доле атомов натрия ниже 0,5 падают парциальное давление паров *Na* и выход излучения; а при доле атомов ртути менее 0,1 резко снижается напряжение на лампе.

Результаты исследования световых характеристик спектров излучения НЛВД различных вариантов, обобщенные в [24], показывают, что с изменением конструкции, в основном, изменению подвергается контур D - линий натрия, который по мере увеличения давления паров натрия и внутреннего диаметра горелки уширяется и самопоглощается. Основной характеризующий этот контур параметр ширина области самообращения D - линий $(\Delta \lambda)_m$ наиболее чувствителен к изменению температуры холодной зоны горелки.

При повышении P_{Xe} в горелке от 20 до 300 мм рт.ст. $(\Delta \lambda)_m$ увеличивается на 8-12 нм. При повышении P_{Na} , когда соотношение уменьшается, теплопроводность плазмы начинает увеличиваться, что и приводит к снижению η_v . В связи с этим установлено некоторое критическое значение $T_{x.m.}$ - $T_{\kappa p}$, после которого «эффект ксенона» становится отрицательным, причем большим значениям d_1 соответствуют меньшие значения $T_{\kappa p}$.

Исследования электрических характеристик показали, что повышение давления ксенона от 20 до 350 мм рт.ст. в горелке приведут к увеличению градиента потенциала *E*, сглаживанию и уменьшению пиков перезажигания в кривой напряжения на лампе, а также увеличению коэффициента мощности лампы, что создает дополнительные ресурсы для совершенствования НЛВД.

В [26] приведены результаты исследований приэлектродного падения и градиента потенциала в натриевом разряде ВД. Показано, что приэлектродное па-

дение ($U_{a\kappa}$) не зависит от тока и конструкции электродов и составляет 4±1 В для активированных электродов и 8±1 В для чисто вольфрамовых.

Влияние состава наполнения и электрического питания лампы на характеристики НЛВД. Спектральное распределение излучение натриевого разряда высокого давления в основном сосредоточено в видимой области оптического спектра (рисунок 1.5). Автором работы [27] сделана попытка изменить спектр излучения натриевого разряда за счет дополнительного введения в разряд химических элементов, которые обладают низким уровнем возбуждения. При этом используемые компоненты наполнения должны удовлетворять следующим основным требованиям [28]:

- спектр излучения используемых добавок должен располагаться в требуемых областях спектра;
- давления паров вводимых в разряд добавок при рабочих температурах лампы должно обеспечивать необходимую интенсивность интересующих линий и не приводить к значительному снижению давления паров основного излучающего компонента;
- масса добавки должна быть минимальной;
- вводимый элемент должен обладать инертностью по отношению к материалам оболочки и электродных узлов, а также обеспечивать стабильность электрических и световых параметров ламп в течение срока службы;

Всем указанным требованиям удовлетворяют щелочные металлы калий, рубидий, цезий. Например, введение Rb, Cs в натриевый разряд более эффективно, так как обладают низкими потерями на теплопроводность. Добавление в разряд паров цезия (рисунок 1.5) привело к изменению спектрального распределения излучения натриевой плазмы. Во - первых, наблюдается уширение самобращенных D - линий натрия, т.е. цезий выполняет функции ртути, как буферного наполнения и у цезия также наблюдается реабсорбция резонансной линии, что свидетельствует о его повышенном давлении.



Рисунок 1.5. Спектральное распределение излучения серийной лампы NAV-T 400 (а), импульсной натриевой лампы (в, г) при импульсах токах 1 и 2 (б), спектр излучения натриевого разряда в смеси с рубидием (д) и цезием (е) при электрической мощности 700Вт. [27]

В результате указанных явлений наблюдается возрастание непрерывного фона на протяжении всей видимой части оптического диапазона. Это связано с повышением концентрации электронов и, соответственно, с увеличением роли механизмов рассеяния энергии на нейтральных атомах и ионах.

Как показывают исследования [29, 30], что в цезиевом импульсно - периодическом разряде удаётся создать плазму с температурой на оси 5500-6500 К и концентрацией электронов $n_e \sim 10^{17} - 10^{18}$ см⁻³. В этих условиях снижение потенциала ионизации атома цезия и слияние, вследствие уширения, высших членов спектральных серий, сходящихся к порогам рекомбинационных 6Р и 5D континуумов, должно приводить к существенному сдвигу порогов этих континуумов в длинноволновую сторону. В результате этого спектр Na-Cs разряда приближается к непрерывному.

Проведенные в работе [27] исследования влияния на спектр излучения параметров импульсно – периодического питания позволили выявить следующие эффекты:

- В сине голубой и ИК областях наблюдаются интенсивные линии ксенона;
- У натриевого D дублета 589,59/589,99 нм отсутствует самообращение;

• Увеличение длительности импульса напряжения приводит возрастанию интенсивности отдельных линий;

Из осциллограмм импульсов тока (рисунок 1.5,6) следует, что расчетное значение сопротивления разряда в максимуме тока (квазистационарная стадия разряда) составляет 1,05 Ом (режим 1) и 0,91 Ом (режим 2).

Как следует из рисунка 1.5,д, введение рубидия в разряд привело к появлению нескольких линий в ИК области. Однако характер излучения натриевого разряда остался неизменным. Основное излучение сосредоточено в D - дуплете натрия и повысилась мощность излучения 4²p-3²s перехода (см. схему энергетических уровней атома натрия [9, 11]).

1.3. Особенности конструкции импульсной лампы с разрядом в парах цезий – ртуть – ксеноновой смеси

Конструктивное исполнение импульсного источника ИК излучения с разрядом в цезий – ртуть – ксеноновой смеси, ограниченным системой из двух сапфировых оболочек, подробно рассмотрено в ряде научных работ [1, 4, 6, 31, 32] и патентов [33, 34]. В данном разделе основное выполнение будет сосредоточено на тех технических решениях газоразрядной лампы, которые в разделе 1.2 выявлены как определяющие параметры ИК излучения. Конструкция импульсной цезиевой лампы с двумя сапфировыми оболочками представлена на рисунке 1.6. Газоразрядная лампа состоит из двух частей - разрядной трубки 1 (горелки) и внешней оболочки 2. Эти элементы имеют различное функциональное назначение.

Разрядная горелка предназначена для преобразования подводимой к катоду 3 и аноду 4 электрической энергии в разряд, формирование плазменного канала в цезий - ртуть - ксеноновой смеси диаметром *d* и длиной *L*. В результате подробно рассмотренным в разделе 1.1 рекомбинационных процессов в плазме, из разрядного объема испускается поток излучения, направленный в определенную область окружающего пространства (индикатрису), границы которой определяются конструкцией газоразрядной лампы и свойствами плазмообразующей среды. При этом от структуры импульсного напряжения, приложенного к электродам 3 и 4, зависит частотная структура импульсов излучения.

Герметизация разрядного объема производится пайкой сапфира стеклокерамическими припоями колпачков 6, соединенных с держателями электродов 3, 4 и сапфировой оболочкой [35, 36]. Наполнение лампы осуществляется разложением бихромата цезия, спрессованного в специальные таблетки, с последующей герметизацией разрядного объема заплавлением таблетками нитинола технологического отверстия в держателе катода 3 [37, 38].

Основное функциональное назначение внешней оболочки газоразрядной лампы заключается в термостабилизации теплофизического состояния разрядной трубки.



Рисунок 1.6. Конструктивное исполнение импульсного газоразрядного источника ИК излучения с двумя сапфировыми оболочками.

- 1 сапфировая разрядная трубка; 2 сапфировый внешний баллон; 3 катод; 4 анод; 5 токоввод в разрядный объем;
- 6 токовводы внешней колбы; А1 и А2 зоны соединения сапфира с металлом.

Это достигается путем заполнения ее объема газом-теплоносителем, например, неоном. Внутренний диаметр сапфировой трубки выбирается, исходя из необходимости обеспечить фиксированный зазор между разрядной горелкой и внешней колбой. Учитывая высокую текучесть неона, повышенные требования предъявляются к спаям токовводов (зона A₂, рисунок 1.6) с сапфировой трубкой. Подробно конструкция и технология этого соединения рассмотрена в работах [1, 4, 39, 40].

В связи с тем, что при работе лампы линейное расширение разрядной трубки больше, чем внешней оболочки, для обеспечения надежного электрического контакта применяются специальные пружинящие фольговые лепестки, соединенные с герметизирующей крышкой 9 [41]. Такое техническое решение позволяет горелке свободно перемещается в полости внешней колбы.

В заключении раздела необходимо отметить следующие особенности эксплуатации представленной на рисунке 1.6 конструкции:

1) Наружная поверхность внешней оболочки охлаждается принудительным потоком воздуха. В результате в системе внешняя оболочка – зазор - разрядная трубка формируется такое тепловое поле, чтобы, с одной стороны, обеспечить максимальное давление паров цезия и ртути, а с другой стороны, исключить нагрев обеих сапфировых трубок и снизить интенсивность непрерывного потока, излучаемого нагретым корундом.

2) Эксплуатация газоразрядной лампы специального назначения производится в условиях пониженных (-60°С) и повышенных (+80°С) температур окружающего воздуха. Поэтому конструктивное исполнение лампы должно обеспечивать надежное ее зажигание в указанном интервале температур, исключая электрический пробой пространства между оболочками.

3) Диаметр *d* и межэлектродное расстояние *L* выбираются из необходимости обеспечения удельной электрической мощности на оболочку требуемой для поддержания температуры холодной точки не ниже 700°C [9] и обеспечения максимального выхода излучения в ИК диапазоне [42]. Соблюдения теплового состояния сапфировой оболочки разрядной горелки на уровне, исключающего ее разрушение под действием термоупругих напряжений [43, 44].

Экспериментальный поиск компромисса в такой многофакторной системе является трудоемкой и сложной задачей без привлечения математического моделирования, позволяющего сузить область оптимизации конструкции газоразрядного источника ИК излучения с двумя сапфировыми оболочками.

1.4. Математическое моделирование и расчетные исследования характеристик импульсных ламп с разрядом в парах металлов

Расчетные исследования теплофизических и плазменных процессов в стабилизированных системой сапфировых оболочек, разрядах, **ДВУХ** осуществлялось на базе математических моделей и методов их реализации, описанных в [45 - 48]. В этих расчетных моделях учитываются все детально основные физические процессы, протекающие в разрядах высокого давления и стенках оболочек. Особое внимание уделяется детальному рассмотрению радиационных полей. Модели [45 - 48] предназначены для использования в расчетных исследованиях стационарных и нестационарных режимов работы ламп переменного токов, ламп импульсного постоянного И И импульснопериодического действия с широкой номенклатурой плазмообразующих сред, включая инертные газы, щелочные металлы и ртуть (Xe, Kr, Cs, Na, K, Rb, Hg).

Плазма разрядов в лампах рассматриваемого типа является источником мощного излучения с КПД преобразования электрической энергии в лучистую до 70-80%. При этом излучение распределено в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетовой до средней инфракрасной области, имеет сложный спектральный состав, включая непрерывную и дискретную компоненты, и определяется большим количеством разнообразных элементарных радиационных процессов, При этом в случае изменения режимов работы газоразрядной лампы, геометрии системы, давления наполнения, состава плазмообразующей среды и т.д. в роли

32

доминирующих процессов выступают различные механизмы воздействия на излучающие центры. Следует подчеркнуть, что относительная роль каждого процесса и механизма в формировании суммарного излучения разряда меняется даже в течение одного импульса разрядного тока через источник излучения. Доминирующие процессы меняются при переходе из одного спектрального диапазона в другой. Таким образом, значительное внимание при построении математических моделей газоразрядных ламп уделяется вопросам правильного и подробного описания процессов радиационного переноса.

1.4.1. Математические модели теплофизических и плазменных процессов в газоразрядных лампах

Структурная схема наиболее полной замкнутой математической модели процессов в импульсной лампе с двумя сапфировыми оболочками в составе внешней электрической цепи представлена на рисунке 1.7. Все процессы сгруппированы по блокам. Каждый блок представляет собой самостоятельные математические модели подсистем рассматриваемой сложной системы, связанных единым процессом преобразования энергии в направлении от запасенной электрической энергии разрядного контура до энергии излучения на разных длинах волн и кондуктивно-конвективного сброса тепла в окружающую среду. Для окончательного замыкания описания процессов в реальной газоразрядной лампе модель должна быть дополнена математическими уравнениями, описывающими распространение излучения в системе отражателей и сред, формирующих окружение работающей лампы в приборе. Впрочем, воздействие собственного отраженного излучения на процессы в разряде и оболочках может быть приближенно промоделировано введением некоторых эффективных коэффициентов. В наиболее общем варианте расчета температурных полей в плазме разряда необходимо учитывать отрыв температур легких и тяжелых частиц, связанный как с наличием внешних электрических полей, так и пространственных градиентов параметров плазмы.

33



Рисунок 1.7. Структурная схема математической модели расчета газоразрядной лампы с двумя сапфировыми оболочками в составе разрядного контура

Рассмотрим краткое описание математических уравнений для формирования базы данных каждого блока, представленного на рисунке 1.7. При записи уравнений энергии для легких и тяжелых частиц под температурой понимается величина, которая после умножения на константу Больцмана дает две трети кинетической энергии хаотического движения частиц.

Для определения скорости изменения внутренней энергии тяжелых частиц W-необходимо рассматривать кинетику заселения уровней, т.к. эта величина выражается через скорости заселения уровней. Сюда же включаются затраты энергии на ионизацию.

В кинетическом блоке модели вычисляются скорости образования или и рекомбинации возбужденных частиц. Для этого необходимо располагать расчетной моделью кинетики заселения возбужденных уровней энергии излучающей компоненты. Обширный круг вопросов, связанных с расчетом распределения частиц по уровням в низкотемпературной плазме и коэффициентов рекомбинации и ионизации, отражен в обзорных публикациях и книгах (см. библиографию в [49]). При этом наиболее разработана модель ударно - излучательной ионизации и рекомбинации. В развитие диффузионного подхода к рассмотрению кинетики заселения уровней в [49] предложен метод расчета, учитывающий дискретность структуры энергетических уровней частиц (модифицированное диффузионное приближение). Отметим, что в [49] получены замкнутые выражения для коэффициентов рекомбинации и ионизации с учетом радиационных переходов, а также для распределения частиц по уровням энергии.

В задачах моделирования излучения в отдельных спектральных линиях, которые решаются при исследовании различных газоразрядных ламп, нужна весьма детальная информация о заселенностях участвующих в излучении уровней и других энергетических атомных уровней, влияющих на этот процесс. В этой ситуации рассмотрение кинетики возбужденных состояний только в диффузионном

35

приближении и его модификациях может оказаться недостаточным. Поэтому кинетику населенностей приходится рассматривать на основе индивидуального учета отдельных низко расположенных уровней, для которых проводится детальное включение в расчет механизмов заселения и опустошения со своими специально подобранными сечениями неупругих процессов. В то же время большое число уровней, примыкающих к континууму, удобно включить в квазинепрерывный спектр и объединить в блок со свободными электронами [49]. Последний вариант при всей его приближенности обеспечивает удовлетворительные результаты, отличаясь при этом исключительной простотой.

Гидродинамический блок модели строится на основе уравнений движения и неразрывности для каждой компоненты плазмы и всей плазмы в целом. Подробно реализация уравнений этого блока рассмотрена в работах [45-47].

Наиболее сложен в реализации блок, связанный с моделированием переноса излучения в средах: разрядной плазме и оболочках. Он строится как на основе точного уравнения переноса излучения, так и на различных его дифференциальных приближениях, включая диффузионное приближение и приближение Шустера- Шварцшильда. Описание данной части модели изложено в [45, 48].

На основе указанных групп уравнений: движения, энергии, непрерывности, кинетики возбуждения и ионизации, переноса излучения строятся математические модели процессов в разрядах с различными характеристиками неравновесности плазмы и условиями применения. Заметим, что в общем случае все фигурирующие в модели материальные функции плазмы приходится рассчитывать в ходе решения задачи. Предварительная табуляция величин практически не может быть выполнена, за исключением, скоростей процессов заселения уровней и ионизации, да и то данная возможность существует только при максвелловской функции распределения свободных электронов по энергиям.

Процессы в импульсных разрядах являются нестационарными, плазма неоднородна по объему и в ней возможно проявление эффектов неравновесности и
неидеальности. Состояние плазмы зависит от давления, состава плазмообразующей среды и режима работы. Применение находят разряды трех типов: высокого, среднего и низкого давлений. Плазма высокого давления, которая рассматривается в данной работе, характеризуется давлениями (0,1 - 1,0) МПа и температурами на оси разряда $(5 - 8) \cdot 10^3$ К. Физические процессы в таких разрядах протекают в условиях, близких к локальному термодинамическому равновесию (ЛТР). В этом случае система уравнений модели включает уравнение энергии для определения единой температуры плазмы, уравнения переноса излучения для расчета дивергенции лучистого потока и самих потоков, уравнения закона Ома, внешней электрической цепи и непрерывности для плазмы в целом, соотношения для определения рабочего давления плазмы в замкнутом объеме.

На основе оценок состояния плазмы, выполненных на этапе I, используется приближение локального термодинамического равновесия. В рамках данного приближения коэффициенты переноса (теплопроводности и электропроводности), а также оптические коэффициенты поглощения могут быть представлены и затабулированы как функции температуры, давления и состава плазмы (соотношения компонент), а коэффициент поглощения - ещё и в зависимости от длины волны.

Система уравнений, описывающих нестационарный разряд с внешней цепью в условиях цилиндрической симметрии и с учетом переноса излучения, формируется в следующем виде [45, 46, 48]:

$$C_{p}\rho\frac{\partial T}{\partial t} + C_{p}\rho\upsilon\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \sigma E^{2} - divF_{n} + \frac{dP}{dt},$$
(1.5)

$$F_{\nu} = -\frac{C}{3K_{\nu}}\frac{dU_{\nu}}{dr},\tag{1.6}$$

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}(rF_{v}) = CK_{v}(U_{vp} - U_{v}), \qquad (1.7)$$

$$divF_{n} = C \int_{v} K_{v} (U_{vp} - U_{v}) dv$$
(1.8)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho \upsilon) = 0$$
(1.9)

$$L_{k}\frac{dI}{dt} + (R_{k} + R_{p})I - U_{c} = 0, \qquad (1.10)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{1}{C_k}I,\tag{1.11}$$

$$R_{p} = \frac{L}{2\pi \int_{0}^{R} \sigma(r) r dr},$$
(1.12)

$$E = \frac{I \cdot R_p}{L},\tag{1.13}$$

где обозначено C_p , ρ - теплоемкость и плотность плазмы, U - скорость радиального движения плазмы, P - давление в разряде, $\sigma(T)$, $\lambda(T)$ - коэффициенты электро- и теплопроводности плазмы, K_v - коэффициент оптического поглощения на частоте v, F_v - спектральный поток излучения плазмы, F_x - интегральный по спектру поток излучения, U_v , U_{vp} - спектральная плотность истинного и равновесного излучения в плазме, L_k , R_k , C_k - индуктивность, активное сопротивление и емкость внешней разрядной цепи, I - ток, U_c - напряжение на конденсаторе, L - длина межэлектродного промежутка, R_p - сопротивление разряда.

Начальные и граничные условия:

$$t = 0, T(r) = T_{gg}(r), U_c = U_{c0}, I = I_{gg},$$
$$r = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \frac{dU_v}{dr} = 0, \upsilon(0) = 0,$$

$$r = R, T = T_w, U_v = -\frac{A}{K_v} \frac{dU_v}{dr}, \upsilon(R) = 0,$$

где R - радиус разрядной трубки, A - константа, $T_{gg}(r)$ - температурный профиль в разряде в режиме дежурной дуги с током I_{gg} .

Для замыкания выписанной системы уравнений необходимо ещё одно соотношение, в качестве которого используется условие сохранения ядер частиц газа в герметичном объеме. Это условие служит для определения давления плазмы, которое принимается постоянным по объему разрядной трубки.

Соответствующее уравнение имеет вид:

$$\int_{0}^{R} n_{m_{R,M}} [P, T(r)] r dr = \int_{0}^{R} \left[\frac{P_{H}}{KT_{gg}(r)} - n_{e}(P_{H}, T(r)) \right] r dr, \qquad (1.14)$$

где P_{H} - давление плазмы в режиме дежурной дуги, n_{msxc} - концентрация тяжелых частиц, зависящая от давления, температуры и соотношения компонент, n_{e} - концентрация электронов.

При расчете давления в разряде согласно (1.14) предполагается, что уход частиц в осевом направлении незначителен и его можно не учитывать.

В противоположном случае, полагая, что давление паров остается неизменным в течение импульса тока, задачу удается несколько упростить, так как давление плазмы оказывается известным и равным давлению в режиме дежурной дуги.

Чтобы воспользоваться соотношением (1.14) необходимо сформулировать модель многокомпонентной плазмы разряда. Последнее обязательно также для расчетов переносных, термодинамических и оптических свойств плазмы.

1.4.2. Состав многокомпонентной плазмы разряда в парах щелочных металлов

Рассматривается трехкомпонентная слабонеидеальная плазма щелочного металла, ртути и инертного газа. Учитываются нейтральные частицы, одно- и двухкратно заряженные ионы. Система уравнений ионизационного равновесия, состояния, соотношения компонент и электронейтральности имеет вид:

$$\frac{n_e n_i^{1+}}{n_i^0} = K_i^{1+}, i = 1, 2, 3$$
$$\frac{n_e n_i^{2+}}{n_i^{1+}} = K_i^{2+}, i = 1, 2, 3$$
$$n_e + \sum_{i=1}^3 \left(n_i^0 + n_i^{1+} + n_i^{2+} \right) = \frac{P}{KT}$$

$$\begin{split} \frac{n_1^0 + n_1^{1^+} + n_1^{2^+}}{n_2^0 + n_2^{1^+} + n_2^{2^+}} =& a_1, \\ \frac{n_1^0 + n_1^{1^+} + n_2^{2^+}}{n_3^0 + n_3^{1^+} + n_3^{2^+}} =& a_2, \\ n_e &= \sum_{i=1}^3 \left(n_i^{1^+} + 2n_i^{2^+} \right), \\ K_i^{1^+} &= 2 \frac{Q_i^{1^+}}{Q_i^0} \left(\frac{2\pi m K T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_i^0 - \Delta E_i^0)/KT}, \\ K_i^{2^+} &= 2 \frac{Q_i^{2^+}}{Q_i^{1^+}} \left(\frac{2\pi m K T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_i^{1^+} - \Delta E_i^{1^+})/KT} \\ \Delta E_i^{0,1^+} &= z \frac{e_0^2}{\rho_D}, i = 1, 2, 3 \\ \rho_D &= \frac{1}{e_0} \sqrt{\frac{KT}{\left(n_e + \sum_i n_i^{1^+} + 4n_i^{2^+}\right)} 4\pi}, \end{split}$$

Обозначения следующие: n_e - концентрация электронов, n_i^{1+}, n_i^{2+} - концентрации первых и вторых ионов, K,h- постоянные Больцмана и Планка, m- масса электрона, z - остаточный заряд частицы (для атома z = 1, для первого иона - z = 2 и т.д.), Q_i - статистические суммы по состояниям (атома Q_i^0 , иона Q_i^{1+}).

Система (1.5) – (1.14) решается при заданных P,T,a_1,a_2 . В результате расчетов определяются концентрации частиц всех компонентов, что обеспечивает необходимую базу для дальнейших расчетов материальных функций плазмы: коэффициентов σ, λ, K_{ν} , а также C_p и ρ в зависимости от температуры, давления плазмы и соотношения компонент (для K_{ν} определяется ещё и спектральная зависимость с учетом дискретного и непрерывного спектров).

1.4.3. Алгоритм реализации математической модели

Для решения системы (1.5) – (1.14) осуществляется конечно-разностная аппроксимация уравнений по трехточечной неявной схеме с использованием интегро-интерполяционного метода. В силу нелинейности выписанных дифференциальных уравнений их разностные аналоги оказываются также нелинейными и необходимо строить итерационную процедуру в процессе решения полученной алгебраической системы уравнений. Используется метод релаксации с коэффициентом релаксации, подбираемым эмпирическим путем. Обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие разрядный контур, решаются модифицированным методом Эйлера. Решение уравнения (1.14) осуществляется методом половинного деления в ходе итерационной процедуры, отмеченной выше.

В результате решения системы (1.5) – (1.14) определяются временные зависимости электрических параметров (тока, напряжения), энергетических (удельной электрической мощности, лучистых и кондуктивных тепловых потоков из плазмы), спектрального распределения излучения, выхода излучения в заданных диапазонах спектра.

Система алгебраических уравнений (1.5) – (1.14) нелинейна, ее линеаризация осуществляется методом Ньютона-Рафсона. Затем полученная система линейных уравнений решается итерациями с применением метода Гаусса.

В расчетах характеристик разряда начальный температурный профиль в плазме определяется из решения стационарной задачи при заданном токе дежурной дуги. Затем проводится непрерывный расчет серии импульсов до установления периодического режима. Возможны две модификации расчета: при заданных параметрах внешнего разрядного контура (R_K , L_K , C_K) или при заданном изменении напряжения на лампе (в частном случае оно может быть постоянным).

Для реализации изложенного алгоритма разрабатывается программный комплекс, сориентированный на постановку и проведение вычислительного эксперимента.

В данной модели все материальные функции используются в виде заранее подготовленных таблиц.

41

Результаты прямого моделирования и оценок показывают, что эффекты неравновесности, вызываемые комплексом факторов, не дают существенных погрешностей в результатах вычислений в приближении модели ЛТР плазмы.

Математическое моделирование требует весьма полной и надежной базы данных по широкому кругу характеристик элементов систем и используемых материалов. База данных, сформированная для задач настоящей работы, содержит следующие свойства плазмы и материалов устройств [45, 46, 50]:

1. Термодинамические свойства плазмы (концентрации частиц, теплоемкость, плотность);

2. Коэффициенты тепло- и электропроводности плазмы;

3. Спектральные коэффициенты оптического поглощения плазмы;

4. Спектральные коэффициенты оптического поглощения и преломления сапфира в зависимости от температуры;

5. Коэффициент теплопроводности сапфира и смеси газов в зазоре между оболочками.

Все перечисленные массивы данных по свойствам плазмы хранятся в привязке к температуре, давлению и соотношению компонент [45 - 50].

1.4.4. Результаты расчета предельных характеристик излучения импульсного разряда в цезий – ртуть – ксеноновой смеси

Исследование факторов, определяющих выходные характеристики ламп и формулирование условий достижения максимальных значений пиковой силы излучения выполнялись на основе анализа массивов данных, полученных с помощью вычислительных экспериментов. В ходе их проведения варьировались состав компонентов плазмы, внутренние радиусы разрядных трубок, вводимая в разряд электрическая мощность (удельная <w> и средняя P_{cp}).

В ходе математического моделирования находились температурные поля в плазме и оболочках ламп, напряжение на разрядном промежутке при заданном токе, поля концентраций электронов, атомов и ионов, спектры излучения.

Таблица 1.3.

Исходные параметры математической модели для оптимизации характеристик излучения.

Наполнение	Параметры	Значения	
Cs-Hg-Xe	Диаметр разрядного канала, <i>d</i>	11, 15, 20, 30 мм	
	Рабочее давление в разряде	1, 5, 10 ат	
	Соотношение ядер Cs-Hg и Cs-Xe	1-1.5	
	Межэлектродное расстояние	35, 50 мм	
	Средняя электрическая мощность на единицу длины разрядного промежутка, <i>P</i> _{ср}	1 - 2 кВт/см	
	Частота следования импульсов, f	450 Гц	
	Рабочие спектральные диапазоны, для ко- торых оптимизируется пиковая сила из- лучения	Диапазон 1 - 2,0 - 4,0	
		МКМ	
		Диапазон 2 - 3,0 - 5,0	
		МКМ	
	Длительность импульсов	260 мкс	

Пиковая сила излучения *I* в заданных диапазонах спектра определялась по формуле

$$I = \frac{\langle w \rangle \pi R^2 \eta_{\Delta \lambda}}{\Omega}, \text{ Bт/стер см}$$
(1.15)

где $\eta_{\Delta\lambda}$ - доля излучения разряда в диапазонах 1 и II оптического спектра, Ω - телесный угол, в который происходит излучение лампы. В настоящих расчетах принималось, что $\Omega = 11,3$ стерадиан.

Средняя электрическая мощность, вводимая в разряд на единицу длины разрядного промежутка, определяется по формуле

$$P_{cp} = \langle w \rangle \cdot \pi R^2 \cdot \tau f , \operatorname{Bt/cm}$$
(1.16)

где *f* - частота следования импульсов, *τ* - длительность импульса прямоугольной формы.

На рисунках 1.8 и 1.9 представлены зависимости пиковой силы излучения *I* от P_{cp} , радиуса *R* и состава плазмы. Пиковая сила излучения относительно слабо меняется с ростом P_{cp} . Согласно рисунку 1.8 увеличение средней мощности в два раза от 0,9 Вт/см до 1,8 Вт/см приводит к росту I_2 на 20% при R=0,55 см и на 13% при R=0,75 см. Это означает, что при переходе с одной длины разрядного промежутка L_e на другую при неизменной средней электрической мощности лампы можно варьировать I_2 в указанных пределах. Например, при средней электрической мощности 5 кВт уменьшение L_e с 5 см до 3,5 см приводит для R=0,55 см и 0,75 см к росту I_{μ} примерно на 7%.

Влияние компонентного состав плазмы на I_2 (рисунок 1.9) при $P_{cp} \approx 1$ кВт/см также относительно невелико, хотя интересно, что передозировка металлов ухудшает ситуацию. Так, по сравнению с кривой 1 кривая 2 соответствует увеличенному в 2 раза количеству всех компонент (Cs, Hg, Xe), а кривая 3 - уменьшенному их количеству в 5 раз. При этом кривой 3 (минимальная из рассмотренных дозировка компонент) отвечает увеличение I_2 примерно на 15%. При P_{cp} в районе 2кВт минимальное количество компонент обеспечивает рост I_2 примерно на 20% по сравнению с максимальной дозировкой.

Наиболее сильно пиковая сила излучения I_2 зависит от внутреннего диаметра разрядной трубки *R*. Этот факт хорошо виден на рисунке 1.8 и отдельно проиллюстрирован на рисунке 1.10 при трех значениях средней электрической мощности P_{cp} . Увеличение R от 0,55 см до 1 см при неизменной P_{cp} приводит к росту I_2 в среднем на 55%, а использование трубок с радиусом 1,5 см позволяет увеличить I_2 почти в 2 раза по сравнению с вариантом R=0,55 см. При разных P_{cp} отмеченная закономерность является общей.

Объяснение данному факту можно найти, анализируя кривые зависимости КПД излучения в диапазоне 2 от средней и удельной электрических мощностей при различных *R*, представленные на рис. 1.11, 1.12.

Из рисунка 1.12 следует, что КПД в диапазоне 2 резко спадает с ростом мгновенной удельной электрической мощности $\langle w \rangle$, вводимой в разряд, причем с увеличением радиуса разрядного канала *R* КПД уменьшается. О причинах данного обстоятельства будет сказано ниже. Здесь же отметим, что при $\langle w \rangle \approx 4$ кВт/см³ увеличение *R* от 0,55 см до 1,5 см, т.е. примерно в 2,7 раза, приводит к уменьшению КПД почти в 2,5 раза, а увеличение *R* от 0,55 см до 0,75 см, т.е. в 1,4 раза, приводит к уменьшению КПД в те же 1,4 раза. В то же время согласно (1.16) средняя мощность на единицу длины *P_{cp}* пропорциональна квадрату радиуса.

Таким образом, если зафиксировать P_{cp} , например, соответствующее <w>=6 кВт/см³ (при этом для R=0,55 см КПД составляет 2,3%, рисунок 1.12), то увеличение R в 1,4 раза до 0,75 см должно сопровождаться уменьшением <w> в 1,96 раза, т.е. для R=0,75 см КПД окажется равным примерно 3% (рисунок 1.12). В итоге, семейство кривых I_2 от P_{cp} характеризуется уже инверсной зависимостью пиковой силы излучения от радиуса, т.е. большим значениям R соответствует большее значение КПД, что и продемонстрировано на рисунке 1.10.

Теперь перейдем к объяснению указанного выше характера зависимости КПД в диапазоне 2 от <w> и R. Для этого обратимся к кривым спектрального распределения коэффициента поглощения при разных температурах и соотношениях компонент плазмообразующей среды (рисунки 1.13 – 1.14). Выбранные температуры соответствуют рабочим режимам функционирования рассматриваемых ламп при средних мощностях до 5 кВт.

Видно, что плазма в диапазоне 2 имеет один только фон коэффициента поглощения на уровне от 0,8 до 10 см⁻¹, а с учетом линейчатой составляющей указанный коэффициент достигает уже 60 см⁻¹, т.е. плазма в данной области спектра является оптически плотной при радиусах разрядного канала порядка 0,55 см и выше.



Рисунок 1.8. Зависимость пиковой силы излучения в спектральном диапазоне 2 от средней электрической мощности на единицу длины лампы.

Параметры плазмы: 5-1-1,5; 1 - R = 0,55; 2 - 0,75; 3 - 1; 4 - 1,5 см.



Рисунок 1.9. Зависимость пиковой силы излучения в спектральном диапазоне 2 от средней электрической мощности на единицу длины лампы. Параметры плазмы: 1 – 5-1-1,5; 2 – 10-1-1,5; 3 – 1-1-1,5; R=0,75 см.



Рисунок 1.10. Зависимость пиковой силы излучения в спектральном диапазоне 2 от внутреннего радиуса разрядной трубки.

Параметры плазмы: 5-1-1,5; $1 - P_{cp} = 0,9$; 2 - 1,25; 3 - 1,5 кВт/см.



Рисунок 1.11. Зависимость КПД излучения в спектральном диапазоне 2 от средней электрической мощности на единицу длины лампы.

Параметры плазмы: 5-1-1,5; 1 - R = 0,55; 2 - 0,75; 3 - 1; 4 - 1,5 см.



Рисунок 1.12. Зависимость КПД излучения в спектральном диапазоне 2 от удельной электрической мощности.

Параметры плазмы: 5-1-1,5; 1 - R = 0,55; 2 - 0,75; 3 - 1; 4 - 1,5 см.

Поэтому в разряде осуществляется режим распространения излучения, близкий к диффузионному, и плазма светит своими слоями, расположенными ближе к поверхности. В данной ситуации увеличение <w>, сопровождающееся ростом уровня температур в плазме и, соответственно, коэффициента поглощения, или увеличение радиуса R приводят к росту оптической плотности и снижению КПД. Одним из проявлений высокой оптической плотности плазмы в ИК области является практически полная нивелировка в излучении дискретной структуры спектра, тогда как в коэффициенте поглощения (рисунки 1.13, 1.14) эта структура хорошо просматривается, особенно при температурах 4000-5000К. Рисунок 1.15 показывает, что спектр излучения разряда характеризуется тем, что линии в области 1,8-5 мкм полностью «растворились» на непрерывном фоне. В других диапазонах спектр сильно «изрезан» линиями поглощения, что обусловлено поглощением излучения центральных «горячих» зон разряда в более холодных периферийных слоях с последующим переизлучением при более низкой температуре. Все это свидетельствует в пользу высокой оптической плотности плазмы в целом по всему учитываемому в ходе моделирования спектральному диапазону.

Изменение характера спектра в случае перехода к объемному режиму излучения разряда иллюстрируется на рисунке 1.16. На этом рисунке представлен разряд очень малого радиуса – 0,1 см при таком же компонентном составе и примерно том же уровне температур, как и на рисунке1.15. Достаточно отчетливо просматриваются линии в ИК - области 3 и 3.5 мкм, которые отсутствуют у оптически плотного разряда на рисунке 1.15 (на рисунке 1.15 их следы скорее воспринимаются как линии поглощения). На вставке рисунка 1.16, растягивающей спектральную область 500 – 1300 нм, хорошо видно, что линии в других областях спектра проявляются в основном в излучении, разумеется, за исключением резонансных линий.

В задачах диссертации стоит вопрос о возможности реализации определенных уровней пиковой силы излучения. Для соответствующего анализа необходимы данные о температурном состоянии оболочек. Зависимости температуры самой напряженной в тепловом отношении внутренней поверхности разрядной трубки *T*₁ от средней электрической мощности при различных радиусах трубки представлены на рисунке 1.17.



длина волны, нм

Рисунок 1.13. Коэффициент поглощения плазмы Cs-Hg-Xe.

Температура плазмы Т=4000К.

Параметры плазмы: a - 1 - 1 - 1,5; 6 - 5 - 1 - 1,5; B - 10 - 1 - 1,5.



Рисунок 1.14. Коэффициент поглощения плазмы Cs-Hg-Xe.

Температура плазмы Т=6000К.

Параметры плазмы: a - 1 - 1 - 1,5; 6 - 5 - 1 - 1,5; B - 10 - 1 - 1.5.



Рисунок 1.15. Спектральное распределение КПД излучения разряда в максимуме тока.

Параметры плазмы: 1 - 1 - 1,5; R = 0,75 см, $P_o = 11$ мм рт. ст., I = 500 А, E = 17 В/см, $\langle w \rangle = 4,83$ кВт/см³. Осевая температура в разряде: $T_o = 5200$ К, средняя температура плазмы $\langle T \rangle = 4800$ К.



Рисунок 1.16. Спектральное распределение КПД излучения разряда в максимуме тока.

Параметры плазмы: 1 - 1 - 1,5; R = 0,1 см, $P_o = 12$ мм рт. ст., I = 15 A, E = 33 B/см, $\langle w \rangle = 15,5$ кВт/см³. Осевая температура в разряде: $T_o = 5200$ К, средняя температура плазмы $\langle T \rangle = 4500$ К.



Рисунок 1.17. Зависимость температуры внутренней поверхности разрядной трубки от средней электрической мощности на единицу длины лампы. Параметры плазмы: 5 – 1 – 1,5; 1 – *R* = 0,55; 2 – 0,75; 3 – 1; 4 – 1,5 см.

Расчеты температурных полей в оболочках ламп проводились при следующих значениях геометрических и физических параметров: толщины стенок разрядной трубки – 0,13 см, толщина зазора между оболочками – 0,1см, коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности лампы к хладагенту – 0,01 Вт/см² К.

При одинаковой P_{cp} увеличение радиуса трубки R, несколько увеличивая долю тепловых потерь на оболочке, вместе с тем снижает тепловую нагрузку на единицу площади поверхности стенки (примерно обратно пропорционально радиусу) и увеличивает площадь поверхности теплосъема (пропорционально радиусу). В результате температура T_1 падает с ростом R. Данные рисунка 1.17 показывают, что при $P_{cp} = 1$ кВт/см увеличение R от 0,55 до 0,75 см снижает T_1 примерно на 11%, увеличение R до 1 и 1,5 см уменьшает T_1 на 15 и 20%. Подобные зависимости T_1 от R сохраняются и при других значениях P_{cp} .

Используя данные рисунков 1.10 и 1.17 можно получить соотношения между пиковой силой излучения и радиусом разрядной трубки R при различных значениях температуры T_1 (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18. Зависимость пиковой силы излучения в спектральном диапазоне 2 от внутреннего радиуса разрядной трубки при различных температурах на внутренней поверхности трубки. 1 – *T*₁ = 1200; 2 – 1300; 3 – 1500 К.

При температуре 1200К изменение *R* от 0,55 см до 0,75 см приводит к росту I_{II} на 22%, а при увеличении *R* от 0,55 см до 1,5 см происходит рост пиковой силы излучения примерно в 2 раза. При самой большой из представленных на рисунке 1.18 температур $T_I = 1500$ К изменение *R* от 0,55 см до 0,75 см обеспечивает возрастание I_2 на 30%, увеличение *R* от 0,55 см до 1,5 см дает рост I_2 примерно в 2,3 раза. Многие из рассмотренных закономерностей в поведении пиковой силы излучения во 2 диапазоне справедливы и для диапазона 1. Соответствующие кривые представлены на рисунке 1.19. Данные этого рисунка по своей сути и комплексу определяющих параметров соответствуют рисунку 1.7.





Параметры плазмы: 5 - 1 - 1,5; 1 - R = 0,55; 2 - 0,75; 3 - 1; 4 - 1,5 см.

Уровень пиковой силы излучения в диапазоне 1 существенно выше, чем в диапазоне 2 (до 7-8 раз). Например, при R=0,55 см и $P_{cp} = 1$ кВт/см значения пиковых сил излучения составляет: $I_2 = 15$ Вт/стер см, а $I_1 = 150$ Вт/стер см. Подобное соотношение величин I_2 и I_1 отражает представленный на рисунке 1.20 спектр излучения. На этом рисунке дается спектр излучения не только разряда, но и лампы. В ИК - области, начиная примерно от 3200 нм и далее, на излучение разряда накладывается излучение разогретых оболочек лампы. При параметрах лампы, соответствующих рисунку 1.20, температура на внутренней поверхности разрядной трубки составляет 1320К, на внешней – 1300К, на внутренней поверхности внешней оболочки – 990К, на внешней – 975К. Участие оболочек в формировании спектра в формировании спектра излучения лампы отражается на глубине модуляции излучения (рисунок 1.20).





Параметры плазмы: 5 – 1 – 1,5; R = 0,75 см; ток I = 500 A; $P_{cp} = 940$ Вт/см.

Видно, что, начиная с длины волны 3200 нм, глубина модуляции постепенно снижается и при длине волны ≈ 5800 нм обращается в нуль. При этом длинноволновая граница пропускания сапфира принимается равной 6500 нм. Приведем те-

перь сводку данных по пиковым силам излучения, ориентируясь на значения полной средней электрической мощности P_{cp} до 5 кВт для двух значений длины разрядного промежутка L_s =3,5 и 5 см. Для этих целей удобно воспользоваться рисунками 1.16 и 1.20, интегрирующими рассмотренные результаты расчетов. Полученные данные сведены в таблицу 1.4, в которой приведены значения полной средней электрической мощности P_{cp} и полной пиковой силы излучения I_{p2} , соответствующим трем допустимым температурам на внутренней поверхности разрядной трубки при четырех значениях внутренних радиусов трубки. Ячейки таблицы 1.4, содержащие мощности, выходящие за указанный предел в 5 кВт, выделены цветом.

Таблица 1.4

Влияние конструктивных и электрических режимов работы газоразрядной лампы на пиковую силу излучения в спектральном диапазоне 2

<i>Т</i> ₁ , К	R, см	<i>L</i> _э = 3,5 см		$L_{3} = 5 \text{ cm}$	
		<i>Р_{ср}</i> , кВт	<i>I_{p2}</i> , Вт/стер	<i>Р_{ср}</i> , кВт	<i>I</i> _{<i>p</i>2} , Вт/стер
1200	0,55	2,2	37	3,2	53
	0,75	2,7	49	3,8	70
	1,0	2,9	63	4,2	90
	1,5	3,2	84	4,5	120
1300	0,55	2,6	39	3,7	58
	0,75	3,2	53	4,6	75
	1,0	3,6	67	5,2	95
	1,5	4,0	88	5,8	125
1500	0,55	3,4	42	4,9	60
	0,75	4,2	54	6,1	78
	1,0	5,1	70	7,3	100
	1,5	5,8	98	8,3	140

Если считать температуры $T_I = 1200 - 1500$ К, выбранные в качестве допустимых, заниженными, то пиковую силу излучения можно поднять выше значений, приведенных в таблице 1.4. Завершая обсуждение представленных материалов, следует отметить, что результаты расчетов оптических, термодинамических, транспортных свойств плазмы разрядов, электрофизических и спектрально-энергетических характеристик разрядов обнаруживают удовлетворительное согласие с данными экспериментов (см., например, [47 - 54]).

1.5. Обобщенный анализ факторов, влияющих на параметры излучения импульсно – периодического разряда. Формирование направлений исследований

В результате проведенного научно – технического анализа и расчетных исследований, выявлено, что основными параметрами, влияющими на пиковую силу, длительность импульса и глубину модуляции излучения являются факторы приведенные на рисунке 1.21. В то же время, учитывая тот факт, что в цели диссертации стояла задача сохранить весогабаритные параметры импульсного источника ИК излучения круг исследуемых параметров можно сузить до следующих воздействующих на характеристики излучения факторов:

1. Конструктивные параметры: размеры электродов, температура холодной точки.

2. Состав наполнения: весовые соотношения компонентов и образующиеся сплавы.

3. Режимы электрического питания: параметры импульса напряжения и импульсно – периодической структуры (несущая и огибающая частоты, длительности импульсов и т.д.).

Поэтому дальнейшие исследования по повышению эксплуатационных характеристик импульсной газоразрядной лампы были направлены на изучение влияния перечисленных параметров на выходные параметры источника ИК излучения.



Рисунок 1.21. Основные факторы, определяющие характеристики излучения газоразрядной лампы с разрядом в парах цезий – ртуть – ксеноновой смеси

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНО – ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В СМЕСИ ПАРОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

2.1. Экспериментальные установки и методики исследований электрических параметров и характеристик излучения импульсных газоразрядных ламп.

В процессе многофакторного эксперимента необходимо иметь возможность оперативно проводить широкий комплекс исследований газоразрядных ламп, направленных на оптимизацию условий электрического питания, охлаждения, выхода в рабочий режим и т.д. Для реализации этой задачи возникает необходимость в разработке универсального испытательного стенда, позволяющего производить указанные экспериментальные работы, и аппаратного обеспечения исследования характеристик излучения газоразрядных ламп в ИК диапазоне.

2.1.1. Экспериментальные источники питания газоразрядных ламп с разрядом в парах щелочных металлов

При разработке требований к источнику электрического питания необходимо учитывать ряд особенностей работы ламп с разрядом в парах щелочных металлов, функционирующих в импульсном и импульсно – периодическом режиме.

Особенности зажигания и выхода в рабочий режим импульсных источников излучения с двумя сапфировыми оболочками были рассмотрены в работах [1, 7, 51], где определены основные схемные решения блоков, которые вошли составной частью в разработанные источники электрического питания экспериментальных ламп.

Для устойчивой работы ламп с разрядом в парах щелочных металлов необходимо наличие дежурной дуги, которая поддерживает проводящее состояние лампы в промежутках между импульсами тока [1, 51]. В качестве такого схемного решения обычно используется импульсный стабилизатор, способный обеспечить заданную величину тока в диапазоне выходных напряжений от 50 до 360В. Кроме этого дежурная дуга выполняет и другие функции. При токе 1-1,2 А канал разряда дежурной дуги расположен концентрично относительно оболочки горелки. Развитие основного разрядного импульса в этом случае происходит за счет симметричного расширения плазменного канала, поэтому отсутствует локальный перегрев внутренней поверхности горелки, что повышает долговечность газоразрядной лампы. С учетом описанных особенностей работы ламп с разрядом в парах щелочных металлов для проведения экспериментальных исследований были разработаны два универсальных источника питания, в которых формирование силовых импульсов тока через лампу обычно производится следующими способами:

- при помощи разряда конденсатора (рисунок 2.1),

- приложением импульсного и импульсно - периодического прямоугольного напряжения от мощного выпрямителя в течение времени, заданного схемой управления ГЗИ 1 (рисунок 2.2), в режимах однополярной (рисунок 2.2,б) и двухполярной (рисунок 2.2,в) последовательности импульсов, формируемой задающим генератором ГЗИ2.

На рисунке 2.1 приведена блок-схема электрического питания измерения электрических и оптических параметров сапфировой лампы с двойной оболочкой. Энергия разряда рабочего конденсатора (*W*) в приведенной схеме рассчитывается по формуле:

$$W = \frac{C_{\kappa} \times U_p^2}{2}$$

где C_{κ} - ёмкость рабочего конденсатора, U_p - напряжение на рабочем конденсаторе, примерно равное удвоенному напряжению (U_o) на выходе выпрямителя, поэтому средняя мощность (P), потребляемая лампой, ориентировочно может быть рассчитана по формуле:

$$P \approx \frac{C_{\kappa} \times U_{p}^{2}}{2} \times f \approx 2 \times C_{\kappa} \times U_{o}^{2} \times f;$$

где *f* - частота следования импульсов с блока управления.

Для повышения точности измерений запуск осциллографов, регистрирующих импульсы: тока лампы, напряжения на лампе, излучения в



Рисунок 2.1. Структурная схема электрического питания лампы с двумя сапфировыми оболочками, оптических и электрических измерений: БП- блок питания стенда «Спардек» ЮЩМЗ.558.076; БУ- блок управления зарядным Тир1 и разрядным Тир2 тиристорами; С_к, L_к – емкость и индуктивность разрядного контура; R_ш – токовый шунт (R_ш=9,45·10⁻⁴ Ом); Д- делитель напряжения (1:1000); Г5-56 –генератор импульсов; БДД – блок дежурной дуги; V1- вольтметр В7-27; А - Амперметр; С_{буф} – буферная емкость (С_{буф}=2000мкФ); Л-лампа; К- кнопка запуска осциллографов; Осц - запоминающий осциллограф; Ф1- фотоприемник на базе ФД-119; Ф2- фотопреобразователь ЮЩЗ.435.095; Ф3- фотопреобразователь ЮЩМЗ.435.091; Ф-005- блок питания Ф1; Б5-7- блок питания Ф3; БП1- батарея питания «Крона».



Рисунок 2.2. Функциональная блок - схема включения ламп с транзисторным модулятором (а) и импульсно – периодическая структура импульсов однополярного (б) и двухполярного (в) напряжения.

С – импульсный накопительный конденсатор, VD1, VD2 – диод, А – амперметр, V – вольтметр, Пр – блок преобразователя, БДД – блок дежурной дуги, ЗУ – устройство зажигающее, ИП – источник подпитки, ТК1 – ТК3 – транзисторный коммутатор, ГЗИ1, ГЗИ2 – генератор задающих импульсов, ИЛ – исследуемая газоразрядная лампа.

Т_н, Т_о – соответственно, период несущей и огибающей частоты импульсов

диапазонах 1 и 2 осуществлялся синхроимпульсом за 50 мкс до открытия тиристора Тир2, обеспечивающего разряд конденсатора C_{κ} через индуктивность L_{κ} и лампу Л. Синхроимпульс подается от двухканального генератора импульсов включением кнопки К. Осциллографы, работающие в режиме внешнего разового запуска имеют уровень запуска, позволяющий фиксировать показания от первого после нажатия кнопки *К* импульса лампы. Запуск осциллографов происходит от одного управляющего генератора последовательно, поэтому для устранения шунтирования сопротивления $R_{\iota\iota}$ земляной шиной соединительного кабеля, в схему измерений введены сопротивления $R_{\iota}=100$ Ом и $R_2=100$ Ом.

Блок управления БУ стенда «Спардек» ЮЩМЗ.558.076 работает в режиме внешнего запуска от генератора импульсов. Блок питания БП стенда «Спардек» обеспечивает заряд конденсатора C_{κ} в диапазоне напряжений U_{κ} =200 – 700 В. Контроль напряжения U_{κ} производится вольтметром V1 с буферной емкости $C_{\delta y \phi}$ с точностью 5%. Параметры дежурной дуги лампы контролируются вольтметром V2 и амперметром A.

Измерение тока через лампу осуществляется безиндуктивным токовым шунтом $R_{ui}=9,45\cdot10^{-4}$ Ом. Напряжение на лампе измеряется с помощью делителя ЮЩМЗ.418.029 1:1000. Питание фотопреобразователей производится от блоков питания фотометра Φ -005 и Б5-7.

Для более точного определения мощности параллельно испытуемой лампе подключен делитель напряжения, что позволило контролировать осциллограммы приложенного к лампе напряжения [52]. Эти данные в реальном масштабе времени вводились в компьютер для проведения расчетов средней и мгновенной мощности, потребляемой лампой. За параметрами всех входящих в источник питания блоков осуществлялся приборный контроль.

В последнее время появился целый класс сильноточных транзисторов (например IRG4PF50W), время открытия и закрытия которых составляют менее 0,3 мкс. Применение таких ключей позволило существенно изменить схему электрического питания импульсных ламп с разрядом в парах щелочных металлов. Наиболее эффективным является способ подачи и отключения прикладываемого к

лампе напряжения от мощного выпрямителя при помощи транзисторного коммутатора (рисунок 2.2). При этом формируется крутой задний фронт токового импульса, зависящий от скорости остывания плазмы (от состава наполнения, охлаждения лампы и т.д.), а не от переходных процессов в коммутирующем элементе. Нами был разработаны два новых источника импульсно – периодического электрического питания импульсных ламп с щелочными добавками, обобщенная функциональная схема которых приведена на рисунке 2.2.

В данном техническом решении блок дежурной дуги БДД, источник подпитки ИП, зажигающее устройство выполняют функции, аналогичные в описанной выше схеме разрядного контура (рисунок 2.1). Отличительной особенностью является наличие трех транзисторных ключей ТК1 – ТК3. Коммутатор ТК1 обеспечивает приведенную на рисунке структуру импульсов, которая формируется генератором задающих импульсов ГЗИ1. Транзисторные ключи ТК2 и ТК3 в зависимости от режима коммутации, задаваемого генератором ГЗИ2, позволяют приложить к лампе импульсно – периодическую структуру однополярного (рисунок 2.2.б) или двухполярного (рисунок 2.2.в) напряжения.

Такая схема электрического питания лампы обеспечивает:

- регулируемое напряжение на выходе выпрямителя $U_{\mu\alpha\kappa}$ - 100 B ÷ 200 B;

- увеличение мощности на лампе P_{π} за счет ступенчатого роста длительности импульсов тока t_{κ} с 4 мкс до 270 мкс с шагом 4 мкс;

- напряжение холостого напряжения дежурной дуги $U_{\partial \partial}$ не менее 280 В;
- плавно регулируемый ток дежурной дуги $I_{\partial \partial}$ в диапазоне 1,0 ÷ 1,5 A;
- максимальную амплитуду импульсов тока до 600 A;
- плавное изменение длительности импульсов тока в диапазоне 4 ÷ 270 мкс;
- увеличение частоты модуляции тока от 400 до 450 Гц с шагом 5 Гц.

Важным свойством разработанного комплекса оборудования является возможность получаемые осциллограммы тока, напряжения и импульсов излучения вводить в вычислительную машину, производить обработку сигналов, получать базу данных для математического моделирования и оптимизации источника излучения с режимами его электрического питания.

2.1.2. Методики исследования характеристик излучения импульсного разряда в парах щелочных металлов

Данный раздел посвящен методам определения следующих характеристик газоразрядного источника ИК излучения:

- величины пиковой силы излучения (Вт/стер)

- коэффициента глубины модуляции силы излучения в относительных единицах (или процентах);

- длительности импульса излучения по уровню 0,5 от максимума (мкс).

Измерения проводились с помощью контрольно-измерительной стойки, состоящей из следующих элементов:

- фотосопротивления ФСГ (спектральный диапазон 1);

- преобразователя излучения ФД-119 (спектральный диапазон 2);

- запоминающего осциллографа типа C9-8 или аналогичного, обеспечивающего аналогичную точность измерения;

- электромеханического затвора с частотой модуляции 50-100 Гц.

Параметры измерялись в направлении перпендикулярном оси лампы. Принцип определения характеристик излучения основан на измерении электрического сигнала на выходе преобразователя излучения, расчете силы излучения (при условии соблюдения «точечности» источника) с учетом спектральных характеристик образцового и измеряемого источников, пересчете средних значений измеряемых величин в пиковые значения силы излучения и расчете коэффициентов глубины модуляции.

Для устранения посторонних засветок перед фотоприемником размещался экран размером не менее 0,5х0,5 м, покрытый черным бархатом, и имеющий в центре отверстие диаметром 0,2 м. Экран устанавливался на расстоянии 0,5 м от лампы. Электромеханический модулятор, обеспечивающий 100%-ную модуляцию проходящего пучка излучения диаметром до 15 мм с частотой 50 – 100 Гц и скважностью не менее 2, размещался перед фотоприемником излучения. Экран,

электромеханический модулятор и фотоприемник располагались перпендикулярно оси лампы так, чтобы оптическая ось контрольно-измерительных приборов проходила через середину разрядного промежутка лампы.

На экране осциллографа регистрировались следующие параметры импульса напряжения, снимаемого с выхода преобразователя (рисунок 2.3): амплитуда (U_m, B) и длительность импульса по уровню 0,5 от $U_m(\tau_{0.5}, c)$.



Рисунок 2.3. Пример осциллограммы электрического сигнала на выходе фотоприемника при измерении параметров излучения лампы.

При включении электромеханического модулятора на экране осциллографа измерялось напряжение (*U*₀, B), соответствующее уровню постоянного излучения. Для спектральных диапазонов 1 и 2 рассчитать по формулам:

- коэффициент глубины модуляции *m* (%) силы излучения:

$$m = \frac{100 U_m}{U_m + U_0} ,$$

- пиковую силу излучения *I*_{пик} (Вт/ср) лампы:

$$I_{nu\kappa} = U_m \cdot l^2 \cdot M/s$$

где *U_m* – напряжение (рисунок 2.3), *l* – расстояние от лампы до приемной поверхности фотоприемника (м), s – коэффициент преобразования фотоприемника по протоколу аттестации (мВм²/Вт), М – поправочный коэффициент фотоприемника на спектральное распределение силы излучения лампы (указывается в паспорте на фотоприемник при его метрологической аттестации). Оценка погрешности аттестации преобразователей показала: - предел суммарной относительной погрешности определения интегральной чувствительности преобразователя ФД-119 при доверительной вероятности 0,95 для спектральных диапазонов 1 и 2 более ± 3 %;

- погрешность измерения относительной спектральной чувствительности преобразователей не превышает ± 5 %;
- предел суммарной относительной погрешности определения коэффициента преобразования ФД-119 при доверительной вероятности 0,95 для спектрального диапазона 2 не превышает ± 6 %.

Таким образом, доверительная граница погрешности определения пиковой силы излучения лампы с вероятностью 0,95 не превышает 20 % при условии аттестации преобразователей с погрешностью не более 9 % и использовании стандартных измерительных приборов:

- для определения расстояний от источника излучения до приемной поверхности преобразователей с погрешностью не более 1 %;
- осциллографа с погрешностью измерений напряжения не более 1,5 %, измерения временных интервалов не более 1 %;

Доверительная граница погрешности измерений глубины модуляции силы излучения в диапазоне от 0,9 до 0,99 и длительности импульсов излучения не менее 100 мкс с вероятностью 0,95 не превышает 0,2 % при использовании указанных выше приборов.

2.1.3. Методика исследования теплового состояния импульсной лампы с разрядом в парах щелочных металлов

Знание распределения температуры поверхности горелки (T_{ob}) в зависимости от мощности и конструктивных особенностей необходимо для разработки эффективных ламп и определения оптимальных условий их эксплуатации в оптико – электронных системах. Кроме этого, исходя из теплового профиля оболочки, можно сформулировать требования к свойствам сапфировых труб и их соединений с металлом при рабочих температурах лампы.

В силу простоты и широкого диапазона измеряемых температур при исследованиях состояния колб разрядных наибольшее теплового ламп распространение получил термопарный способ [53, 54]. Однако в этом случае измерение Тоб имеет ряд существенных особенностей, которые необходимо учитывать при выборе конструкции термопары и оценке погрешности измерения температуры. Во – первых, измеряются температуры поверхности, как правило, тонкостенных оболочек, имеющих коэффициент теплопроводности х примерно на два порядка ниже, чем χ материала термоэлектродов. Во – вторых, оболочки, на поверхности которых измеряется температура, прозрачны, и на термопару воздействует лучистый поток, выходящий из разряда[53].

Исключить указанные недостатки позволяют методы пирометрии (термографии) [55]. В связи с объемным характером излучения полупрозрачных кристаллов сапфира к ним неприменимы стандартные методы термографии. Поэтому для измерения температуры разрабатываются специальные пирометры частичного излучения, работающие за границей пропускания исследуемого объекта [56]. С ростом температуры от комнатной до рабочих значений лампы интервал непрозрачности материала оболочки в диапазоне длин волн $\Delta \lambda$, который можно использовать для пирометрии, меняется. В случае сапфира наблюдается незначительное расширение и смещение Δλ в коротковолновую область спектра инфракрасной границы пропускания [56]. Поэтому наиболее интересна коротковолновая граница первой колебательной полосы поглощения корунда. В этой области k_{λ} полупрозрачных материалов может достигать $k_{\lambda} = 10^2 \div 10^3$ см⁻¹, а излучательная способность приближается к единице. В связи с малым значением коэффициента отражения k_r в этой области на результаты измерений его влияние незначительно. Следовательно, если на приемник попадает излучение из этой части области непрозрачности сапфира, то сигнал приемника будет однозначно связан с температурой поверхности оболочки из этого материала.

В наших экспериментах по определению температурных полей сапфировых оболочек была использована тепловизионная система SDS HotFind-LXT, построенная на использовании многоэлементных приемников излучения, т.е. матриц, число элементов которых позволяет сформировать телевизионный кадр с хорошим пространственным разрешением. Основными техническими характеристиками используемого тепловизора являются рабочий диапазон исследуемых температур от -20°C до +1500°C при регистрации излучения в спектральном диапазоне 7,5-14 мкм. Приемник располагался на расстоянии 1,5 м от оси исследуемой лампы. Первый замер температурного распределения вдоль оболочки производился через 1-2 сек. после выключения лампы. По мере остывания производилась регистрация температурного поля через каждые 10 сек. По полученным результатам строилась зависимость $T_{of.} = f(t)$ для каждой точки разрядной трубки. Истинная температура оболочки при горении разряда определялась аппроксимацией кривой остывания оболочки на ось абсцисс (t=0).

2.2. Термодинамический анализ разряда в парах сплавов цезия с ртутью, рубидием и калием

Целью данного раздела является теоретическая оценка возможных последствий введения в цезиевый разряд калия и рубидия взамен ртутного буфера.

Ртуть в силу ее уникальных свойств является одним из основных элементов, входящих в состав плазмообразующих сред:

• у паров ртути низкая теплопроводность, так как она одноатомна и имеет одну из самых больших масс, что способствует снижению удельных потерь в разрядном столбе;

• потенциалы возбуждения и ионизации атомов ртути существенно выше, чем у других щелочных металлов, вводимых в качестве излучающих добавок, что позволяет вводить эти компоненты наполнения при значительно меньших давлениях паров;

• пары ртути имеют низкое давление при комнатной температуре (около 0,17 Па). При повышении температуры до рабочих значений давление ртути может быть доведено до нескольких МПа. Благодаря этому облегчается зажигание разряда в холодном состоянии лампы и имеется возможность регулирования рабочего давления буфера в широких пределах.

В то же время как показали исследования в работах [1, 4. 7, 8] при наполнении ртутью газоразрядной лампы в присутствии другого излучающего элемента в разрядном объеме образуется амальгамное соединение. В результате этого явления давления компонентов над амальгамой ниже давления чистых металлов [28] при рабочих температурах лампы, а теплопроводности смесей в каждом конкретном случае отличаются друг от друга. Изменение теплопроводности плазмообразующей среды неизбежно приведет к трансформации теплофизического состояния оболочки разрядной трубки и, соответственно, глубины модуляции газоразрядной лампы.

В случае понижения теплопроводности смеси паров металлов, глубина модуляции возрастет. В противном случае, будет наблюдаться падение *m*. В свою очередь повышение давления паров металлов в разряде неизбежно приведет к росту пиковой силы излучения [1, 4]. Поэтому исследование влияния температуры и состава плазмообразующей среды на теплопроводность смеси и давление паров компонентов над металлами и сплавами является важной задачей при конструировании газоразрядной лампы.

За основу расчета давления насыщенных паров компонентов над амальгамой (или сплавами) взяты математические модели, предложенные авторами в работах [57, 58]. В данных публикациях вычисляются давления пара щелочного металла P_{M} и ртути P_{pm} , которые определяются температурами в разрядном T_{p} и заэлектродном T_{I} объёмах, размерами этих объёмов V_{p} , V_{I} , исходным содержанием компонент в амальгаме g^{o}_{M} и g^{o}_{pm} и весом амальгамы G. В процессе испарения весовое содержание компонент в амальгаме (сплаве) вследствие большой летучести паров ртути меняется и в равновесии доли компонент в амальгаме становятся другими (g_{M} и g_{pm}), отличными от начальных значений g^{o}_{M} и g^{o}_{pm} .

Для исследования влияния различных параметров на давление паров щелочной добавки и ртути была составлена система уравнений с дополнительными

72
соотношениями, связывающими мольные и весовые доли компонент в амальгаме в рабочем состоянии лампы.

$$G_{M} + G_{pm} + G_{am} = G \tag{2.1}$$

$$G_{M} = \frac{P_{M} \cdot V_{p}}{R_{M} \cdot T_{p}} + \frac{P_{M} \cdot V_{1}}{R_{M} \cdot T_{1}}$$
(2.2)

$$G_{pM} = \frac{P_{pm} \cdot V_p}{R_{pm} \cdot T_p} + \frac{P_{pm} \cdot V_1}{R_{pm} \cdot T_1}$$
(2.3)

$$P_{_{\mathcal{M}}} = P_{_{\mathcal{M}}}^{o} \cdot r_{_{\mathcal{M}}} \tag{2.4}$$

$$P_{pm} = P_{pm}^{o} \cdot r_{pm} \tag{2.5}$$

$$r_{\scriptscriptstyle M} + r_{\scriptscriptstyle pm} = 1 \tag{2.6}$$

$$g_{M} = \frac{G \cdot g_{M}^{\circ} - G_{M}}{G_{aM}}$$
(2.7)

$$r_{M} = \frac{g_{M}}{g_{M} + (1 - g_{M})\frac{\mu_{M}}{\mu_{nm}}}$$
(2.8)

$$r_{pm} = \frac{1 - g_{M}}{\frac{\mu_{pm}}{\mu_{M}} g_{M} + (1 - g_{M})}$$
(2.9)

В выражениях (2.1-2.9) приняты следующие обозначения: G_{M} , r_{M} и G_{pm} , r_{pm} - вес пара и мольные доли щелочного металла и ртути, соответственно, в амальгаме массой G_{aM} при работе лампы; μ_{M} , μ_{pm} - молекулярные массы; $R_{M}=R_{o} / \mu_{M}$; $R_{pm}=R_{o} / \mu_{pm}$ - газовые постоянные; R_{o} - универсальная газовая постоянная; V_{p} , V_{I} - объёмы разрядного промежутка и заэлектродных областей; P^{o}_{M} , P^{o}_{pm} - давление насыщенных паров излучающей добавки и ртути, как индивидуальных веществ.

Реализация системы уравнений (2.1) – (2.9) совместно с разработанной методикой расчета теплопроводности по методу Брокау и динамической вязкости [57] позволили получить графические зависимости, представленные на рисунках 2.4. – 2.9.



Рисунок 2.4. Зависимость давления насыщенных паров цезия (точечная линия), рубидия (пунктирная линия) и калия (сплошная линия) над амальгамой от температуры холодной точки газоразрядной лампы.



Рисунок 2.5. Зависимость давления насыщенных паров ртути над амальгамами цезия (точечная линия), рубидия (пунктирная линия) и калия (сплошная линия) от температуры холодной точки газоразрядной лампы.

2.2.1. Давление паров и теплопроводность паров щелочных металлов

над сплавами с ртутью

Для формирования полной картины явлений, происходящих в разряде, при замене в составе плазмообразующей среды одного компонента на другой, рассмотрим влияние на давление и теплопроводность введения рубидия взамен цезия в Cs – Hg – Хе смеси. На рисунке 2.4 представлена расчетная зависимость давления паров щелочных металлов над амальгамой в диапазоне температуры холодной точки от 700К до 1500К.



Рисунок 2.6. Зависимость теплопроводности насыщенных паров смеси ртути с цезием (точечная линия), рубидием (пунктирная линия) и калием (сплошная линия) от температуры холодной точки газоразрядной лампы.

Как следует из представленных данных ход кривых давления паров цезия и рубидия над амальгамой качественно совпадают. При этом, начиная с 1100К, давление паров рубидия имеет значение выше на 100 кПа вплоть до 1500К. Явление стабилизации давления паров указанных металлов при 1100К объясняется переходом к разряду в ненасыщенных парах. В насыщенных парах рост давления подчиняется уравнению Антуана, а в ненасыщенных – закону Менделеева-Клапейрона. Перегиб кривой давления паров щелочных металлов (рисунки 2.4, 2.7) связан с полным испарением их из амальгамы (или сплава) и переходом разряда из насыщенных паров в ненасыщенные. При этом, чем выше концентрация тяжелого компонента в амальгаме (сплаве), тем выше температура перехода к разряду в ненасыщенных парах. Подтверждением, сделанному заключению, является выравнивание давлений паров ртути над амальгамами щелочных металлов (рисунок 2.5) в интервале температур 1100 – 1300К. Наблюдаемое на рисунке 2.4 резкое нарастание давления паров калия связано с избытком этого металла в амальгаме при рассматриваемом весовом соотношении щелочных металлов и ртути (50:50).

Представленная на рисунке 2.6 расчетная зависимость теплопроводности смеси щелочных металлов с ртутью показывает, что в Cs – Hg плазмообразующая среда меньше всего осуществляет нагрев сапфировой оболочки. Первый участок кривых теплопроводность смеси (рисунок 2.6 и 2.9) в интервале температур T = 700 - 800 К соответствует теплопроводности Hg-Xe смеси, так как количество испарившегося цезия при данной температуре чрезвычайно мало. На следующем интервале температур T = 800 - 1100 К (рисунок 2.6 и 2.9) теплопроводность плазмообразующая среда изменяется в основном за счет снижения концентрации в сплаве и повышения давления паров цезия. Следовательно, чем выше содержание цезия в исходной амальгаме (сплаве), тем ниже теплопроводность смеси, так как из всех ее компонентов цезий имеет наименьшую теплопроводность. Кроме этого, чем выше содержание цезия в исходной амальгаме цезия в исходной амальгаме, тем протяженней температурный интервал.

Поэтому выбор состава наполнения серийных ламп СП2-1500 [1, 4], основанный на использовании цезий – ртуть – ксеноновой смеси, оправдан и правомочен, а прямая замена цезия на калий или рубидий отрицательно скажется на глубине модуляции газоразрядной лампы.

2.2.2. Давление паров и теплопроводность паров цезия над сплавами с рубидием и с калием

Новым вариантом изменения состава плазмообразующей среды является замена ртути на щелочной металл, который сможет образовать сплав с цезием

различного весового содержания. На рисунках 2.7 – 2.8 представлены зависимости давления паров цезия сплавом и теплопроводность паров его смеси с рубидием.



Рисунок 2.7. Давления насыщенных паров цезия над сплавом с рубидием в зависимости от состава и температуры холодной точки газоразрядной лампы.

Из рисунка 2.7 видно, что уменьшение концентрации рубидия в сплаве приводит к возрастанию давления паров цезия.

Например, при температуре 1100К увеличение массы цезия в сплаве с 2,5 до 7,5 мг позволяет увеличить давление его паров с 50 мм рт.ст. до 250 мм рт.ст. При этом, если сопоставить данные рисунка 2.4 и рисунка 2.7, то при температуре 1100К наблюдается более высокое давление паров цезия над сплавом, чем над амальгамой. Этот факт свидетельствует о повышенной концентрации атомов цезия в разряде и можно ожидать увеличение пиковой силы излучения газоразрядной лампы.

При исследовании влияния состава сплава цезия с рубидием на теплопроводность смеси их паров выявлена зависимость, аналогичная представленной на рисунке 2.7, т.е. уменьшение весового содержания рубидия приводит к снижению тепло-проводности смеси.



Рисунок 2.8. Зависимость теплопроводности насыщенных паров цезия над его сплавом с рубидием в зависимости от состава и температуры холодной точки газоразрядной лампы.



Рисунок 2.9. Зависимость теплопроводности смеси насыщенных паров рубидия и калия в зависимости от состава сплава и температуры холодной точки газоразрядной лампы.

При этом при составе Cs:Rb = 75:25 и температуре 1100К теплопроводность паров рассматриваемой смеси ($\lambda_{Cs-Rb} = 6,6 \cdot 10^{-3}$ Вт/м·К, рисунок 2.8) в 1,7 раза ниже значений теплопроводности для цезий – ртутной смеси ($\lambda_{Cs-Hg} = 1,15 \cdot 10^{-2}$ Вт/м·К, рисунок 2.6).

В итоге не вызывает сомнения правомочность рассматриваемого технического решения, основанного на двух основных положениях:

1. Выполнить замену ртути на рубидий в составе плазмообразующей среды серийной лампы СП2-1500 (ТУ 6343-005-07616187-02)

2. Для обеспечения параметров излучения, превышающих требования на лампу СП2-1500 (ТУ 6343-005-07616187-02), в состав наполнения газоразрядной лампы вводится рубидий массой, не превышающей 25% от общей дозировки металлов.

Как следует из рисунка 2.9, введение в разряд калия приведет к увеличению теплопроводности смеси и, как следствие, падению глубины модуляции излучения газоразрядной лампы.

2.3. Спектрально – энергетические исследования импульсно – периодического разряда в парах компонентов сплавов щелочных металлов

Понятно, что наибольший интерес для разработки модулируемого инфракрасного источника представляет мощность излучения в интервале длин волн 2,0 - 5,0 мкм, но знание энергетического баланса во всем оптическом диапазоне дает возможность частично понять происходящие процессы в плазме и выработать способы управления спектральными характеристиками лампы.

При исследованиях характеристик излучения экспериментальных образцов ламп с различными плазмообразующими средами на основе щелочных металлов нами использовался универсальный блок электрического питания, блок-схема которого приведена на рисунке 2.2.а. Испытания ламп проводились при напряжении

на накопителе 200В и структуре следования импульсов согласно рисунка 2.2,6. Длительность импульса задающего генератора $t_{ген.}$ подбиралась таким образом, чтобы напряжение дежурной дуги $U_{\partial.\partial.}$ имело значение в интервале значений 60 - 80В. Известно [57], что величина $U_{\partial.\partial.}$ является косвенной характеристикой давления насыщенных паров в разряде, т.е. для чистоты эксперимента суммарное давление паров компонентов плазмообразующей среды поддерживалось близким для всех образцов ламп.

Для формирования полной физической картины разряда в ходе сравнительного анализа проводились измерения и расчет электрических характеристик (импульсы тока и напряжения, временное изменение сопротивления разряда) и энергетический баланс мощности излучения по методике, рассмотренной в разделе 2.1. Для проведения исследований были изготовлены экспериментальные образцы ламп с конструкторскими характеристиками, приведенными в таблице 2.1. В качестве пускового газа во всех исследуемых лампах использован ксенон при давлении 70 мм рт.ст.

Таблица 2.1

Тип лампы	Размеры плаз- менного столба		Электрические характеристики						
	<i>L_{мэ},</i> мм	<i>d</i> , мм	U_{π}, B	<i>t</i> _{ген} , мкс	$U_{\partial\partial},\mathrm{B}$	Р л, Вт	Р уд., Вт/см		
K	90,5	7	200	108	63	660	73,3		
K - Cs	88,4	7	200	108	63	630	71,6		
K - Rb	60,9	5	200	108	78	620	101,6		
Cs – Rb №1	89,5	7	200	108	60	700	77,8		
Cs - Rb №2	59,4	7	200	108	78	670	111,7		
Na - Cs	60,1	5	200	108	105	620	103,3		
Na - Rb	59,1	7	200	80	60	730	123,7		
Cs - Hg	59,8	7	220	108	60-75	680	113,3		

Конструктивные характеристики и электрические параметры работы экспериментальных ламп

На рисунке 2.10 представлены спектральные характеристики некоторых исследованных разрядов.



Рисунок 2.10. Спектры излучения импульсно периодического разряда в парах Na - Rb (a), Na - Cs (б), K (в), K - Rb (г) при удельных электрических мощностях $P_{yo} = 73 - 123$ Bt/см.

Из приведенных данных видно, что спектральные характеристики в спектральных диапазонах 1 и 2 разнятся для различных разрядов в парах щелочных металлов и их сплавов. В спектральном диапазоне 1 имеет преимущество излучение натрий – цезиевого разряда, который уступает по интенсивности излучения в диапазоне 2 натрий – рубидиевому разряду. Характер излучения в диапазоне 1 представляет собой наложение интенсивных линий на непрерывный фон, который

81

также распространяется на весь спектральный диапазон 2. Данные результаты хорошо согласуются с теоретическими выводами, сделанными в главе 1.

Для сравнительного анализа интенсивности разрядов в различных плазмообразующих средах использовались описанные в разделе методики измерения пиковой силы излучения в диапазонах 1 и 2 и средней силы излучения в спектральных интервалах (таблица 2.2.), выделяемых посредством специальных светофильтров с пропусканием в диапазонах согласно таблицы 2.2.

Полученные результаты сгруппированы в таблицу 2.2, анализ которой позволяет сделать следующие выводы:

1. В результатах измерений наблюдается корреляция между данными пиковой силы и средней силы излучения в спектральных диапазонах 1 и 2. Это важное заключение, потому что подтверждает правомочность проводимой оценки пиковой силы излучения используемыми фотоприемными устройствами.

Таблица 2.2

	т, % в Диа- пазоне 2	Пиковая си- ла излуче- ния, Вт/ср		Средняя сила излучения, Вт/ср в различных спектральных диапазонах, мкм					
Тип лампы		Диа- пазон 2	Диа- пазон 1	Диа- пазон 1	Диа- пазон 2	0,7 – 2,7	0,4 – 0,7	0,4 -10,6	
K	82,3	22,3	51,3	7,0	3,5	20,4	3,3	46,0	
K - Cs	94,4	22,0	53,5	6,3	6,1	32,8	6,0	56,9	
K - Rb	92,7	13,4	43,5	3,1	2,1	18,8	2,2	28,4	
Cs - Rb №1	86,1	19,2	40,7	11,3	9,6	28,4	9,4	56,9	
Cs - Rb №2	92,6	35,6	90,3	7,4	5,5	28,4	8,3	61,3	
Na - Cs	90,2	13,6	49,1	3,1	2,2	24,1	4,6	37,2	
Na - Rb	90,5	20,3	48,1	9,2	8,1	24,1	10,3	46,0	
Cs - Hg	90,3	21,7	53,5	7,0	5,5	28,4	7,9	48,1	

Параметры излучения экспериментальных образцов ламп

Как следует из раздела 2.1. при расчетах пиковой силы излучения в ИК диапазонах необходимо учитывать поправочный коэффициент М используемого фотоприемника на спектральное распределение излучения исследуемой газоразрядной лампы. Поэтому в дальнейшем обсуждение пиковой силы излучения в спектральных диапазонах 1 и 2 будет иметь только информационный характер.

Наибольшую среднюю силу излучения в спектральных диапазонах 1 и
обеспечивают разряды в парах цезия с рубидием, соответственно 11,3 и 9,6
Вт/ср при *P_{vd.}* = 77,8 Вт/см.

3. Увеличение удельной электрической мощности Cs - Rb разряда, например, до *P_{yd}* = 111,7 Вт/см (см. таблицу 2.2), приводит к снижению интенсивности излучения газоразрядной лампы практически во всех спектральных диапазонах кроме 0,4 - 10,6 мкм, где средняя сила излучения составляет 61,3 Вт/ср. Полученный результат свидетельствует о том, что у данного разряда некоторая часть энергии разряда расходуется на нагрев оболочки и, соответственно, на ее излучение за длинноволновой границей пропускания.

4. Средняя сила излучения импульсно - периодического разряда в парах цезия и рубидия в спектральных диапазонах 1 и 2 превосходит в 1,6 - 1,7 раза силу излучения ламп с цезий - ртуть - ксеноновой плазмообразующей средой при меньшей удельной электрической мощности.

Таким образом, приведенный анализ характеристик излучения показал возможность улучшения параметров серийных ламп СП2-1500 [1, 4] при использовании импульсно - периодического разряда в парах цезий - рубидий - ксеноновой смеси.

Сравнение модуляционных характеристик (таблица 2.2) исследуемых разрядов в спектральных диапазонах 1 и 2 показывает, что цезий-рубидиевая лампа (под №1) при удельной мощности $P_{y\partial}$ = 77,8 Вт/см имеет глубину модуляции m = 86,1% в сравнении с 90,3% у Сs - Hg - Хе лампы, работающей при удельной электрической мощности $P_{y\partial}$ = 113,3 Вт/см (таблица 2.2). Данный факт частично связан с повышеной температурой оболочки цезий – рубидиевая лампы $T_{o\delta}$ = 810°С в сравнении с $T_{o\delta}$ = 780 °С для Cs - Hg - Хе разрядного источника (таблица 2.3 и рисунки 2.5 и 2.6). В тоже время повышение удельной электрической мощности Cs - Rb -

Таблица 2.3

Температура оболочки в центре разрядного промежутка газоразрядных ламп с различными плазмообразующими средами

Тип лампы	К	K-Cs	K-Rb	Cs-Rb №1	Cs-Rb №2	Na-Cs	Na-Rb	Cs-Hg
Температура в центре оболочки, °С	900	775	850	810	760	710	980	780
<i>Р_{уд}</i> , Вт/см	73,3	71,6	101,6	77,8	111,7	103,3	123,7	113,3

Важным вопросом эффективной работы ОЭС является обеспечение стабильности импульсов тока, и как следствие, импульсов излучения в структуре сигналов. В работах [1, 4, 45] проведен расчетно - экспериментальный анализ формирования плазменного канала в процессе прохождения через газоразрядную лампу серии из трех импульсов тока. Было показано, что только после прохождения третьего импульса из серии сопротивление разряда достигает (0,2 – 0,4) Ом, осевая и средние температуры выравниваются, давление паров возрастает в 4 раза, концентрация электронов достигает (0,5 – 0,9)·10¹⁸см⁻³, электроны равномерно заполняют разрядный канал и зона проводимости достигает 80% от диаметра разрядной трубки.

В наших экспериментах наблюдается противоположный эффект, который связан с заменой ртути на щелочной металл, и как следствие, изменением теплофизического состояния плазмообразующей среды. Выполненный сравнительный анализ показал, что практически у всех исследованных разрядов первый токовый импульс на несколько ампер больше двух последующих (таблица 2.4 и рисунки 2.11,6 и 2.12,6). Данный факт свидетельствует о том, что формирование плазменного канала серии импульсов начинается в достаточно ионизованной плазме дежурной дуги. Например, потенциал ионизации ртути (10,39В) в сравнении с цезием (3,89 В) и рубидием (4,18 В) [9] значительно выше, чем у указанных щелочных металлов.

Импульсы	Тип лампы									
тока в структуре	К	K - Cs	K - Rb	Cs - Rb №1	Cs - Rb №2	Na-Cs	Na - Rb	Cs - Hg		
Первый импульс	128	140	80	132	192	73,6	208	170		
Второй импульс	134	132	76,8	136	164	72,8	204	188		
Третий импульс	134	134	77,6	138	164	76,8	204	192		
Руд, Вт/см	73,3	71,6	101,6	77,8	111,7	103,3	123,7	113,3		

Пиковые значения тока в структуре из трех импульсов

Данное предположение требует дополнительного исследования, так как импульс тока определяется условиями разряда и конструктивными параметрами газоразрядной лампы.

Приведенные на рисунках 2.11 и 2.12 данные исследований импульсно - периодических Cs - Hg - Xe и Cs - Rb - Xe разрядов показали:

1. Пиковые значения токов третьего импульса структуры примерно одинаковы 170 - 180А (рисунки 2.11,а и 2.12,а).

2. Сопротивление плазменного канала (2 - 3 Ом) стабилизируется в случае обоих разрядов на 100 - й микросекунде с момента подачи импульса питающего напряжения (рисунки 2.11, в и 2.12, в).

3. Температура оболочек (рисунки 2.11,г и 2.12,г) 780 - 790°С в случае обоих разрядов одинаковы.

Таким образом, представленные результаты позволяют сделать заключение, что при конструировании Cs - Rb - Хе лампы режимы электрического питания и условия охлаждения могут быть идентичны эксплуатационным параметрам серийной лампы СП2-1500 [1,4] с разрядом в Cs - Hg - Хе смеси.

Несмотря на наблюдаемое преимущество Cs - Rb - Хе лампы во избежание возможной ошибки, нами был исследован Cs - К - Хе лампы, так как согласно таблицы пиковая и средняя сила излучения близки к Cs - Hg - Хе разряду.







Рисунок 2.11. Электрические характеристики Cs-Hg-Xe разряда - импульс тока (а), импульсно - периодическая структура (б), расчетная временная зависимость сопротивления разряда в течение третьего импульса (в) и температурное поле лампы (г) при удельной электрической мощности $P_{yo} = 113,3$ Вт/см.



Рисунок 2.12. Электрические характеристики Cs-Rb-Хе разряда - импульс тока (а), импульсно - периодическая структура (б), расчетная временная зависимость сопротивления разряда в течение третьего импульса (в) и температурное поле лампы (г) при удельной электрической мощности *P*_{yd} = 77,8 Bt/см.

Важным аспектом поиска нового конструктивного варианта с разрядом в парах щелочных металлов является создание безртутного экологически чистого источника излучения. По этой причине ниже приведены результаты сравнительного спектрального анализа всех перечисленных разрядов.

Методика сравнительного анализа разрядов с различными плазмообразующими средами заключается в сопоставлении спектрально – энергетических характеристик при работе ламп в равных эксплуатационных условиях и при одинаковых удельных электрических мощностях. При этом нет необходимости в проведении абсолютизации спектров излучения.

87



Рисунок 2.13. Спектральное распределение излучения Cs-K-Xe (толстая линия) и Cs-Hg-Xe разрядов (пунктирная линия).



Рисунок 2.14. Спектральное распределение излучения Cs-Rb-Xe (толстая линия) и Cs-Hg-Xe разрядов (пунктирная линия).

Наложение спектров друг на друга дает четкое представление об энергетическом преимуществе излучения исследуемого разряда в требуемом спектральном диапазоне. Данная методика справедлива только при условии совпадения режимов работы спектрального прибора (ширина входной и выходной щелей, удаленность источника от спектрометра, напряжение питания приемника и т.д.) и фотоприемника (спектральная чувствительность, быстродействие и т.д.). В наших экспериментах все указанные особенности были строго учтены.

Как следует из рисунков 2.13 и 2.14 разряды в смеси Cs-Rb-Xe и Cs-K-Xe имеют явное преимущество перед Cs-Hg-Xe разрядом. Поэтому в дальнейших исследованиях основное внимание уделялось этим разрядам.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП С РАЗРЯДОМ В ПАРАХ ЦЕЗИЙ - РУБИДИЕВОЙ СМЕСИ

Для создания импульсной лампы на основе разряда в парах щелочных металлов невозможно использовать в полном объеме конструктивнотехнологическую базу цезиевых ламп высокого давления [1, 4, 7]. Известные к началу работы варианты конструкций ламп постоянного и переменного тока с разрядом в парах щелочных металлов тоже нельзя рассматривать как базовые, что обосновано во введении к диссертации.

Для разработки конструкции лампы на основе импульсного разряда в парах щелочных металлов, удовлетворяющей приведенным выше требованиям, обладающей достаточной простотой для организации промышленного выпуска и обеспечивающей высокую долговечность требовалось решить следующие задачи:

1. Разработать конструкцию электродов для обеспечения их длительной устойчивой работы в импульсно – периодическом режиме следования токовых импульсов в парах щелочных металлов.

2. Разработать герметичное соединение электродных узлов с сапфировой оболочкой, обеспечивающее высокую механическую прочность, позволяющее исключить утечку щелочного металла по спаю [58] и проникновение в разряд неона, заполняющего внешнюю колбу лампы.

3. Разработать технологию откачки и наполнения ламп с высокой чистотой конструкционных элементов, достаточной точностью дозировки щелочных металлов в разрядном объеме и фиксацией расположения холодной точки горелки для обеспечения повторяемости и стабильности характеристик излучения разрабатываемых импульсных ламп.

4. Разработать герметичное соединение токовводов с внешней сапфировой колбой, обеспечивающее высокую механическую прочность и позволяющее исключить утечку неона по спаю и проникновение воздуха в пространство между оболочками. 5. Разработать элементы центрирующей арматуры для фиксации положения разрядной трубки внутри внешней оболочки, позволяющие обеспечить требуемое теплофизическое состояние разрядной трубки и исключить электрический пробой по неону.

Решению указанных проблем посвящена настоящая глава с последовательным изложением результатов исследований, соответствующих перечисленным задачам.

3.1. Особенности конструкции и технологическая схема изготовления разрабатываемой лампы

Основное конструктивное исполнение базового варианта газоразрядной лампы представлено на рисунке 1.5, а технологическая последовательность изготовления таких ламп приведена на рисунке 3.1. Как следует из рисунка 1.5, конструктивно лампа состоит из двух коаксиально расположенных частей: горелки 1 и внешней колбы 2, которые изготавливаются независимо (рисунок 3.1) технологической последовательности сборки, и лишь на конечных операциях соединяются в единое целое.

В начале производятся работы по выращиванию сапфировых труб по методу А.В. Степанова [59 - 62], их шлифовке, в случае горелки, внутренней поверхности трубы и внешней поверхности наружной оболочки. Данная операция очень важна, так как она обеспечивает точный диаметр обработанной поверхности и в дальнейшем, как следствие, зазор соединяемых деталей. Кроме того, глубина внутренней шлифовки баллона у горелки фиксирует электродные узлы в определённом положении и, тем самым, обеспечивает точность междуэлектродного расстояния [63]. После промывки и отжига сапфировые баллоны горелки передаются на операцию сборки с электродными узлами.

Конфигурация электродных узлов импульсной лампы выбиралась исходя из режима работы лампы (импульсный, однополярный), необходимости обеспечения их надёжного соединения с оболочкой, возможности откачки и наполнения горелки плазмообразующей средой, а также возможности их устойчивой работы в



Рисунок 3.1. Технологическая схема изготовления лампы с двумя сапфировыми оболочками.

условиях разряда в парах металлов. Рассмотрению особенностей конструкции анодного и катодного узлов посвящен раздел 3.2.

Анод и катод лампы соединяются вакуумной пайкой титановым припоем с другими конструктивными элементами (колпачками, держателями) электродных узлов [патент], изготовленными из ниобиевого сплава, имеющего коэффициент температурного расширения (КЛТР) близкий к КЛТР сапфира. Это необходимо для получения согласованного спая электродных узлов с сапфировой оболочкой. С этой целью нами был выбран стеклокерамический припой (стеклоцемент) системы CaO - MgO - Al₂O₃. Такой состав обеспечивает длительную работу в условиях воздействия паров щелочных металлов, имеет хорошее взаимодействие и смачиваемость с сапфиром и ниобием, образуя переходные вакуумплотные слои на границах спая при рабочих температурах [44, 64 - 66]. Стеклоцемент наносится вручную на поверхность ниобиевого колпачка электродного узла, который фиксируются в сапфировом баллоне и подвергаются температурной обработке. При нагреве происходит расплавление припоя и заполнение зазора за счёт капиллярных сил.

В разрядную горелку, после проверки на герметичность, через откачной штенгель в катодном узле загружаются последовательно таблетки титан - никелевого припоя, титан - цезиевой и титан - рубидиевой смесей, а после откачки производится наполнение разрядного объема ксеноном. Состав титан - никелевого припоя определяется диаграммой состояния [67] и обеспечивает температуру плавления T=1220°C. Затем горелка помещается в вакуумную печь и подвергается термообработке. При этом внутри горелки происходит возгонка цезия и рубидия, расплавление титан - никелевых таблеток, которые герметизируют рабочий объём горелки, фиксируя при этом положение холодной точки. Таким образом, горелка готова к сборке с внешним баллоном.

Пайка внешнего баллона осуществляется по технологии, подробно рассмотренной в работе [68]. Все процессы, происходящие при нанесении и при пайке медью подробно будут рассмотрены в разделе 3.4.

Далее горелка устанавливается во внешний баллон 2 и жёстко опрессовывается коваровым колпачком 7 по ниобиевому токовводу у анодного узла 8 согласно [69]. Второй конец горелки имеет подвижный контакт, так как при работе лампы температура оболочки горелки составляет 1300-1500°С, а внешней колбы ≈ 400°С, поэтому за счёт подвижного контакта и из-за разности величин относительного удлинения, горелка может свободно перемещаться во внешней колбе. Нами разработана конструкция [70] в виде неразборного контакта внешней оболочки и вывода горелки при помощи трех полос, присоединенных точечной сваркой. Контактные полосы, вне зоны сварки, имеют изгиб под углом 60-120°, что создает пружинистый эффект при расширении горелки внутри внешней колбы. Далее сборка закрывается специальной коваровой крышкой 10 с медным штенгелем и герметично соединяется при помощи лазерной сварки. Через медный штенгель производится откачка и наполнение неоном. Окончательная операция – пережим медного штенгеля и защита его металлическим колпачком от механических воздействий. С учетом перечисленных пооперационных технологических особенностей и требуемых эксплуатационных характеристик необходимо выполнить расчетно -экспериментальные исследования отдельных конструктивных элементов газоразрядной лампы.

3.2. Разработка конструкции электродных узлов лампы с импульсно - периодическим разрядом в цезий - рубидиевых парах

Как уже отмечалось, основной характеристикой лампы является глубина модуляции (*m*), которая определяется как импульсным излучением плазмы, так и постоянной составляющей непрерывного излучения нагретых электродов, оболочек лампы и т.д. Распыление электродов на внутреннюю поверхность горелки существенно снижает глубину модуляции. Таким образом, конструктивное исполнение электродных узлов, их эрозионная стойкость должны обеспечивать глубину модуляции в течение нескольких сот часов непрерывной работы.

3.2.1. Разработка конструкция анодного узла

Потемнение оболочки импульсной лампы большей частью связано с распылением катода [10], конструкция анода имеет меньшее практическое значение. Тем не менее рассмотрим конструктивное исполнение анода.

В работе [71] предложен вариант анода для лампы накачки лазеров постоянного тока с разрядом в парах щелочных металлов, обеспечивающий работоспособность лампы в течение нескольких тысяч часов в номинальном режиме при рабочих токах в пределах I_I =3÷5A. Анод изготавливался из прутка торированного вольфрама BT-15 в виде цилиндрического стержня, имеющего сферическую форму конца электрода, обращённого к разряду, диаметром 3 мм и проточку (участок меньшего диаметра), обеспечивающий удовлетворительный прогрев рабочей головки анода до температуры 2300 – 2500 К. В данной работе этот вариант конструкции был принят базовым.

Для определения размеров анода оценим средний рабочий ток разрабатываемой лампы. Из осциллограмм, приведенных в работе [1], пиковое значение импульса тока $I_{пик}$ =370А при его длительности по уровню 0,5 $t_{0,5}$ =100мкс. При этом лампа работала при частоте следования импульсов f=400Гц. Определим средний ток лампы I_2 , условно приняв форму импульса как равнобедренный треугольник: $I_2 = I_{nuk} \cdot t_{0.5} \cdot f = 450 \cdot 10^{-4} \cdot 400 = 18A.$

Таким образом, конструкция анода должна обеспечивать работу лампы без распыления электродов при прохождении среднего тока около 18А.

Температура анода определяется тепловым потоком из плазмы и джоулевым нагревом проходящего через электрод тока [72]. Средняя мощность теплового потока на электрод лампы имеет вид:

$$Q = \frac{I \cdot V}{2},\tag{3.1}$$

где V- вольтов эквивалент теплового потока, V=8B.

Количество тепла, выделяющегося в аноде при прохождении тока, определяется как

$$Q = \frac{0.96 \cdot \rho \cdot l}{\pi \cdot d_1^2} \cdot I^2 \cdot t, \qquad (3.2)$$

где ρ - удельное сопротивление вольфрама; d_l , l – диаметр и длина анода, t – время прохождения тока.

Для устойчивой работы анода необходимо, чтобы плотности тепловых потоков из плазмы и за счёт джоулевого нагрева для лампы накачки и разрабатываемого источника были равны. Оба выражения 3.1 и 3.2 приводят к одинаковой формуле для диаметра анода *d*₂ конструируемой лампы:

$$d_2 = d_1 \cdot \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} = 3 \cdot \sqrt{\frac{18}{5}} = 5,7 \,\text{mm}.$$

В итоге можно сделать заключение, что для режимов работы лампы, соответствующих требованиям ТУ 6343-005-07616187-02, диаметр рабочей части анода должен быть не менее 6 мм.

Следует отметить, что цилиндрическая геометрия рабочей части анода газоразрядной лампы модулированного ИК излучения не является оптимальной, поскольку температура нагрева рабочей части анода в процессе функционирования разрядного источника и, следовательно, величина немодулированной составляющей генерируемого ИК излучения определяется величиной разрядного тока и площадью привязки разряда (рабочей части анода).

Понятно, чем больше площадь рабочей части анода, тем температура анода ниже. Поэтому является актуальной задача минимизации немодулированной составляющей ИК излучения газоразрядной лампы, источником которой является анод, при сохранении заданной величины интенсивности модулированной составляющей излучения.

Нами разработана конструкция анода (рисунок 3.2), у которого поверхность рабочей части анода выполнена в виде двух примыкающих поверхностей, одна из которых представляет собой боковую поверхность прямого усеченного конуса, обращенного меньшим основанием в сторону разрядного пространства, а другая – часть сферической поверхности. Причем примыкание формообразующих



Рисунок 3.2. Конструкция анода газоразрядной лампы [73] 1, 2 – коническая и сферическая поверхность рабочей части анода; 3 – точка линии примыкания поверхностей рабочей части анода; 4 – образующая конической части анода.

рабочую часть анода поверхностей выполнено так, что образующая конической поверхности является касательной к сферической поверхности, а больший (R) и меньший (r) радиусы конической поверхности и угол (α) между осью и образующей конической поверхности связаны соотношением:

$$\frac{2R^2\sin\alpha}{R^2-r^2}\langle 1.$$

Увеличение суммарной площади поверхностей 1 и 2 рабочей части анода приводит к уменьшению термической нагрузки на анод. При этом снижается температура рабочей части анода, что, соответственно приводит к уменьшению немодулированной составляющей ИК излучения, источником которого является анод, и увеличивается глубина модуляции генерируемого газоразрядной лампой ИК излучения.

3.2.2. Разработка конструкции катодного узла

Излучение цезиевой лампы в ИК диапазоне является функцией температуры плазмы, в которой происходит электрический разряд, причём, как показали

теоретические оценки [1], изменение средней температуры разряда в 2,0...2,5 раза приводит к изменению интенсивности излучения в 30...40 раз и, следовательно, повышение пиковой силы ИК излучения можно обеспечивать за счёт увеличения её электрической мощности [1].

В то же время особенность конструкции цезий – ртутной лампы состоит в том, что повышение электрической нагрузки приводит к пластической деформации её катодного узла и, соответственно, нарушению работоспособности лампы и даже к её разрушению. Этот факт объясняется следующими соображениями. Действительно, температура катода определяется тепловым потоком из плазмы разряда и джоулевым нагревом за счёт проходящего через катодный узел электрического тока. Количество тепла (Q), выделяющегося на держателе (штенгеле) в зоне установки керна катода, при прохождении электрического тока определяется соотношением:

$$Q=I^2Rt,$$

где *I*- величина электрического тока, *R* - электрическое сопротивление держателя катода (штенгеля), *t* - длительность токового воздействия.

При увеличении температуры держателя керна катода от первоначальной величины, за которую можно принять комнатную температуру, на величину ΔT количество выделяющегося тепла (*Q*) составляет $Q = c\Delta T$. В итоге получаем выражение для величины температурного нагрева штенгеля:

$$\Delta T = \frac{I^2 R t}{c}, \qquad (3.3)$$

где *с* - удельная теплоёмкость ниобия, *t* - время нагрева.

Как следует из работы [1, 4] величина пиковой силы излучения цезиевой лампы, превосходящей величину собственного теплового излучения защищаемого летательного аппарата не менее, чем в 10 раз, может быть обеспечена, если средняя величина протекающего через лампу электрического тока составляет не менее 25 А (пиковое значение токового импульса 600 А, длительность импульса 10⁻³ сек, частота повторения импульсов 400 Гц). Электрическое сопротивление *R* штенгеля, выполняющего функцию держателя керна катода, определяется величиной:

$$R = \rho \frac{l}{\frac{\pi}{4} \left(d_2^2 - d_1^2 \right)}, \qquad (3.4)$$

где *ρ* - удельное сопротивление ниобиевого штенгеля, *d*₁ и *d*₂ внутренний и наружный диаметры трубки штенгеля, *l* - длина зоны нагрева.

Существующая технология откачки, наполнения и последующей герметизации цезиевой лампы ограничивает диаметр штенгеля величиной не более 3 мм при толщине стенки 0,3 мм. Подставляя уравнение (3.4) в (3.3) и выполняя расчет получаем, что воздействие джоулевого нагрева на ниобиевый штенгель приводит к увеличению его температуры (за 1 сек на длине 1 мм) до величины порядка 2816°C. Увеличение температуры за счёт теплового потока из плазмы дополнительно составляет порядка 600°C [1]. Так как температура плавления ниобия составляет 2500°C [74], то возможность повышения пиковой силы излучения разрабатываемой лампы ограничена величиной допустимой электрической нагрузки, так как её увеличение неминуемо приводит к пластической деформации держателя (штенгеля) керна катода, и последующему разрушению катодного узла и лампы в целом.

Предложенная на рисунке 3.4 конструкция держателя катода 7, выполняюшая одновременно функции системы наполнения газом и парами металлов через штенгель 9 и фиксацию электрода, исключает все перечисленные недостатки и реализована в опытном производстве лампы СП4-1500.

3.3. Герметичное соединение электродных узлов с сапфировой оболочкой

В состав каждого электродного узла ламп с сапфировой оболочкой кроме самого электрода входит его (часто в литературе его называют штенгелем), через который в ряде случаев происходит откачка и наполнение лампы рабочим веществом, а также металлический колпачок, для герметичного соединения (спая) электродного узла с оболочкой [75].

Соединение металлических деталей электродного узла осуществляется как правило с помощью электронно-лучевой сварки или пайкой высокотемпературными припоями. Откачка и наполнение разрядного объема лампы щелочным металлом производится через один из держателей, в котором либо делается для этой цели отверстие, либо электрод закрепляют в штенгеле специальным образом, чтобы откачку и наполнение лампы производить через капилляры между держателем и электродом.







Рисунок 3.4. Конструкция держателя электрода. [76]

 ниобиевый колпачок, 2,3 – коническая и цилиндрическая часть колпачка, 5 – стеклокерамический спай, 6 – сапфировая оболочка, 7 – держатель электрода, 8 титановый спай, 9 – откачной штенгель, α – угол образующей конусной части.

Наиболее сложной и трудоемкой является операция герметичного соединения электродного узла с оболочкой. Соединяемые материалы должны иметь близкие коэффициенты температурного расширения (КТР) в достаточно широком интервале температур для обеспечения согласованности спая. Этому же требованию по отношению соединяемым материалам должен удовлетворять и материал припоя. Как было установлено при разработках натриевых ламп высокого давления [9], наиболее приемлемым конструкционным материалом для соединения с поликристаллической или монокристаллической окисью алюминия являются ниобий или его сплавы [74], обладающие весьма близким к этим материалам КТР в диапазоне температур до 1500°С. Кроме того, испытания натриевых ламп показывают, что длительный, в течение нескольких сотен часов контакт ниобия с высокотемпературными парами и жидкой фазой щелочных металлов в разрядном объеме лампы не приводит к каким-либо нежелательным последствиям.

Все обусловило использование ниобиевых сплавов типа H6-1 и H6ЦУ (содержание ниобия в них превышает 95%) для изготовления колпачков и держателей электродных узлов лампы накачки на основе дугового разряда в парах щелочных металлов. Единственным, но весьма серьезным недостатком ниобия и его сплавов является его интенсивное окисление на воздухе при температуре свыше 400° C, с образованием оксида Nb₂O₅ [77, 78].

Наибольшее распространение при изготовлении горелок ламп с монокристаллической оболочкой получили так называемые охватывающие спаи, в которых металлический колпачок электродного узла охватывает по внешней поверхности с торца оболочку [79]. Однако, в нашем случае охватываемые спаи (рисунок 3.3) представляют особый интерес, поскольку позволяют избежать балластных полостей, в которых возможна конденсация щелочных металлов.

Как показали дальнейшие исследования и испытания образцов, достаточно глубокое размещение электродного узла в сапфировой трубке обеспечивает высокую механическую прочность такого спая. Использование разработанной конструкции и технологии соединения электродного узла с оболочкой, когда колпачки полностью находятся внутри последней, значительно упрощает защиту электродных узлов лампы накачки при ее работе без дополнительной внешней колбы. Разработанное нами конструкторское решение электродного узла с использованием конического ниобиевого колпачка (рисунок 3.4), позволяющее равномерно распределить механические напряжения в зоне спая, позволило дополнительно повысить механическую прочность спая. Важную роль в обеспечении надежности спая имеют физико – химические процессы, происходящие при пайке электродного узла. За счет теплового воздействия в соединяемых материалах происходят теплофизические процессы, приводящие к изменению свойств элементов спая, в частности, наблюдается рекристаллизация ниобия. В технологических исследованиях [64] установлено, что скорость этого процесса определяется температурой отжига металла, энергией и энтропией активации перемещения границ зерен. Исследования миграции границ зерен в образцах особой чистоты показали, что введение в металлическую структуру малых концентраций растворимых добавок, приводит к снижению скорости перемещения границ зерен. Поэтому в наших экспериментах сравнивались изменения свойств чистого ниобия и его сплава с цирконием.

В случае чистого ниобия получено, что явление рекристаллизации начинается при 900 °С, а при температуре $T_{om:mc.} = 1600$ °С зерно укрупняется настолько, что становится соизмеримым с сечением образца [64]. В то же время вакуумный нагрев лент сплава НбЦу (0,8 - 1,4 вес. % Zr) при достижении температуры 1000 °С структурно не изменяется и только при $T_{om:mc.} = 1800$ °С зерна становятся соизмеримыми с сечением образца, т.е. температура пайки стеклокерамическим цементом должна быть в пределах 1350-1500°С. Исходя из этого условия, для получения герметичного соединения был выбран стеклокерамический припой состава СаО-Al₂O₃-MgO в весовом соотношении CaO : Al₂O₃ равным 48 : 52 вес % с температурой плавления эвтектики 1450 °С.

Изучение влияния отжига на образцы выбранного припоя показали, что с ростом температуры нагрева до 1480 °C происходит изменение фазового состава цемента. Проведенный нами рентгенофазный анализ цемента, спеченного при температурах 1500 и 1600 °C, показал присутствие в образцах алюминатов кальция типа CaO·Al₂O₃ и 12CaO·7Al₂O₃. Элементарный подсчет показывает, что относительная весовая концентрация кальция в алюминате типа $12CaO·7Al_2O_3$ в 1,37 раза больше, чем в алюминате кальция типа CaO·Al₂O₃. Наблюдаемое увеличение концентрации кальция в спае приводит к повышению хрупкости спая и росту напряжений в соединении. Поэтому в технологии изготовления токоввода не-

допустимо использование стеклокерамического цемента с температурой плавления выше 1450°С. При этой температуре пайки не происходит значительной диффузии ниобия в стеклокерамический цемент и образования вторичных фаз за счет обогащения структуры спая кальцием.

> 3.4. Разработка технологии откачки, наполнения и герметизации разрядного объема лампы

Вопрос наполнения газоразрядной лампы рабочим веществом, являются одним из важнейших технологических процессов, так как чистота плазмообразующей среды, положение холодной точки и т.д., согласно блок – схемы, приведенной на рисунке 1.21, определяют параметры источника ИК излучения.

3.4.1. Разработка герметизирующего узла и технологической последовательности откачки и наполнения разрядной трубки.

Подробное изложение разработанной технологии откачки и наполнения лампы с сапфировой оболочкой рабочим веществом (щелочные металлы и буферный инертный газ) приведено в работах [80, 81]. Остановимся здесь на принципиальных ее особенностях.

Основная особенность разработанной технологии- дозировка щелочных металлов не в виде чистых металлов, а в виде таблеток, состоящих из бихромата щелочного металла в смеси с порошком титана. Впервые такой способ дозировки щелочных металлов описан в [82]. Размеры изготавливаемых таблеток обеспечивают их размещение в катодном держателе (штенгеле), через который проводится откачка разрядного объема лампы.

После размещения дозировочных таблеток в штенгеле лампу устанавливают на откачном пост, обеспечивающий остаточный вакуум в лампе не хуже 0,7х10⁻³ Па (0,5х10⁻⁶ мм рт.ст.). После откачки и прогрева лампа через катодный штенгель наполняется до необходимого давления буферным газом и отпаивается от поста.

Далее проводится операция герметизации катодного штенгеля лампы, в соответствии со способом предложенным в [83]. Сущность данной операции заключается в предварительном пережиме штенгеля и пропускании через место пережима мощного импульса тока, который обеспечивает расплавление материала штенгеля в центре пережима, что и приводит к герметизации штенгеля.

Операция восстановления щелочных металлов из бихроматов и их перегонка в разрядный объем лампы является заключительной в технологии наполнения лампы. При нагреве лампы до температуры ≥600°С в дозируемых таблетках происходит следующая реакция восстановления чистых щелочных металлов (Ме) из их бихроматов:

$$Me_2Cr_2O_7 + 2Ti \xrightarrow{\geq 600^{\circ}C} 2Me + Cr_2O_3 + 2TiO_2$$

Восстанавливаемый щелочной металл по зазорам между керном катода и штенгелем переходит в разрядный объем лампы. В штенгеле остаются шлаковые образования окиси хрома и титана, сохраняющие прежнюю форму таблеток. Во избежание влияния остаточных веществ на состав плазмообразующей среды разрядный объем отсекается от зоны расположения таблеток герметизацией специального технологического отверстия путем расплавления титано - никелевого припоя 10 (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5. Конструкция герметизирующего элемента катодного узла [84].

 1 – герметизирующий элемент; 2 – спай герметизирующего элемента с оболочкой;
3 – сапфировая оболочка; 4 – внутренняя полость герметизирующего элемента; 5
– сквозной канал в герметизирующем элементе; 6 – катод; 7 – откачной штенгель;
8 – кольцевая ступень; 9 – спай герметизирующего элемента и штенгеля; 10 – титано – никелевый припой Разработанный способ наполнения лампы щелочными металлами отличается простотой, высокой производительностью и обеспечивает точность дозировки щелочного металла не хуже 0,1 мг. В этом его преимущества пред другими известными способами [85, 86], основанными на тепловой перегонке щелочных металлов из дозировочных ампул на откачном посту.

Кроме того, использование разработанного способа введения щелочных металлов в лампу также позволяет проводить предварительную термообработку лампы во время откачки.

3.4.2. Расчетная методика определения массы компонентов при наполнении газоразрядных ламп

При рассмотрении плазменных явлений в лампах с разрядом в парах щелочных металлов, в частности цезия, можно выделить три основные стадии - инициирование разряда, формирование плазменного канала и квазистационарную стадию [1, 4]. Сразу после зажигания разряд осуществляется в инертном газе (ксеноне), поскольку в нерабочем («холодном») состоянии температура горелки недостаточна для заполнения парами металлов (в первую очередь цезия) ее разрядного объема. По мере роста электрической мощности металлы переходят в парообразное состояние и разрядный процесс начинает происходить в смеси паров металлов и ксенона.

Рассмотрим методику расчета масс металлов на примере цезий – ртуть – ксеноновой смеси с последующей доработкой применительно к сплавам щелочных металлов. В сформировавшемся плазменном канале вся электрическая энергия в момент пикового значения импульса тока полностью расходуется на компенсацию потерь в окружающую среду за счет излучения, газодинамических процессов и теплопроводности. Известно, что уменьшение удельных тепловых потерь может быть достигнуто путем выбора рабочего вещества с минимальной теплопроводностью, а т.к. теплопроводность уменьшается с ростом атомного веса газа или пара, то более выгодно применять в качестве неизлучающих компонентов наполнения горелки газов или паров с наибольшим атомным весом.

Связь между вводимым в горелку количеством излучающего металла и давлением, установившимся при работе газоразрядной лампы приведена в работе [87]. В этой работе показано, что количество вещества A и выполняющего роль буфера ртути, которое необходимо ввести в газоразрядную лампу, чтобы при работе создать парциальное давление p(A) при условии, что во время работы вещества находятся полностью в парообразном состоянии, в первом приближении, может быть рассчитано по следующей формуле:

$$m_1(A) = 0.7 p(A) d^2 \frac{M_A}{M_{Hg}}$$

Где m_1 - удельная дозировка (на единицу длины трубчатой оболочки горелки) вещества A, мг/см³; M_A и M_{Hg} - молекулярные веса вещества A и ртути, соответственно; p(A) - парциальное рабочее давление вещества A, атм; d - внутренний диаметр разрядной трубчатой оболочки горелки ГРЛ, см.

Разделив m(A) на объем горелки лампы единичной длины ($\pi d^2 / 4$), получим выражение для удельной дозировки вещества А в составе наполнения:

$$m(A) = \frac{4m_1(A)}{\pi d^2} \approx 0.9 \, p(A) \frac{M_A}{M_{Hg}}$$

В работе [88] приведены результаты комплексных исследований, из которых следует, что максимальная величина КПД излучения в спектральном диапазоне II обеспечивается, когда величина давления ненасыщенных паров цезия составляет 200 - 1000 мм рт.ст. (0,26-1,32 атм.), и, следовательно, оптимальная величина удельной дозировки цезия (Cs) в составе наполнения должна составлять:

$$0,16 \le m(Cs) \le 0,79$$
; MГ/CM³.

Из работы [89] также следует, что удельная объемная дозировка ртутной составляющей наполнения газоразрядной лампы, в которое введено вещество А, при условии, что ртуть также, как и вещество А, находится полностью в парообразном состоянии, т.е. при условии отсутствия в рабочем режиме в разрядном объеме амальгамы, определяется формулой:

$$m(Hg) = m(A)\frac{M_{Hg}}{M_A}$$
(3.5)

где m(Hg) - удельная объемная дозировка ртути, мг/см³; m(A) - удельная объемная дозировка вещества А, мг/см³; M_A и M_{Hg} - молекулярные веса вещества А и ртути, соответственно.

Таким образом, величина удельной объемной дозировки ртути в составе наполнения газоразрядной лампы составляет:

$$0,24 \le m(Hg) \le 1,18 \text{ mg/cm}^3$$

По аналогии из формулы (3.4) для сплава цезия с рубидием получаем:

$$0,05 \le m(Rb) \le 0,24$$

Таким образом, полученные выше ограничения по дозировке рубидия, позволяют получить максимальную эффективность излучения разряда в цезий – рубидий - ксеноновой смеси и использованы при наполнении опытной партии лампы СП4-1500.

3.4.3 Разработка способа герметизации разрядного объема газоразрядных ламп

Если вопрос выбора материала токоввода для разрядной трубки в работе [44, 64] обоснованно решен в пользу использования сплава ниобия с цирконием НбЦУ, то анализ физико - химических свойств применяемых припоев для пайки элементов конструкции газоразрядной лампы из этого материала требует отдельного рассмотрения.

Исходя из ранее перечисленных свойств компонентов плазмообразующей среды, можно ввести некоторые ограничения при выборе используемых припоев в представленной на рисунке 3.6 конструкции лампы.

Во - первых, эти вещества должны обладать химической стойкостью к воздействию паров щелочного металла при температурах до 1700°С. Это прежде всего касается зоны закрепления катода 2 и анода 3 в держателях 5, 6 и в зоне пайки Б колпачка 4. Нагрев этих областей осуществляется за счет теплопроводности электродов 2 и 3, контактирующих с высокотемпературной разрядной плазмой.



Рисунок 3.6. Конструкция разрядной трубки с сапфировой оболочкой 1 - сапфировая оболочка, 2 - катод, 3 - анод, 4 - колпачок из сплава НбЦУ, 5 держатель катода, 6 - держатель анода, 7 - титановый припой, 8 - припой из никелида титана, 9 - таблетка бихромата цезия, 10 - отверстие герметизации. А - зона пайки стеклокерамическим припоем, Б - зона пайки титаном

Во - вторых, применяемые материалы должны иметь более высокую работу выхода, чем у материала катода 2 и анода 3 [1, 4]. В противном случае «привязка» разряда будет осуществляться к заэлектродным областям (зоны А и Б, месту герметизации отверстия 10 и т.д.). Такой эффект приведет либо к распылению материала держателя 5, либо к локальному перегреву и разрушению лампы в зонах А и Б.

Наиболее удовлетворяют перечисленным критериям титан (*T*_{nn} = 1668 °C [90]) для пайки электродного узла и сплавы титана с никелем (сплав TH-1, никелид титана [91]) для герметизации горелки.

В пользу применения перечисленных материалов можно привести следующие доводы. Согласно работы [90] взаимодействие титана со щелочными металлами не происходит, а растворимость его во ртути ничтожна (до 10⁻⁵ масс. %). Аналогичными свойствами обладает никель [92].

Анализ фазовых диаграмм [93] и данных работы [94] позволяет сделать следующие выводы:
- при высоких температурах (выше температуры плавления титана) ниобий и титан неограниченно растворяются друг в друге с образованием непрерывного ряда твердых растворов [93, 94];

- в титане неограниченно растворяется цирконий, входящий в состав сплава НбЦУ. При этом температура плавления сплавов титана с цирконием может быть ниже температуры плавления чистого титана [93];

- ниобий хорошо растворяется в никеле при температурах ниже температуры плавления никеля (*T*_{nn}=1453°C [93]).

В итоге, можно сделать вывод, что титан и сплав ТН-1 будут образовывать надежные герметичные спаи с ниобием или его сплавом с цирконием (НбЦУ) при относительно низких температурах.

Важным фактором, влияющим на качество спая в газоразрядной лампе, является краевой угол смачивания θ титаном и никелидом титана поверхности сплава НбЦУ, определяющий степень заполнения припоем зазоров между соединяемыми деталями 4 и 5, 6 и герметизации отверстия 10. На герметичность соединения существенно влияет время температурной выдержки при пайке, так как в этот момент происходит насыщение расплава припоя материалом основы, приводящее к изменению его растекаемости по поверхности [95]. По этой причине в наших экспериментах время выдержки при температуре плавления припоя было минимально и не превышало трех минут.

Для определения *θ* нами использовались вертикально расположенные ниобиевые цилиндры, на торцевой поверхности которых размещались специально изготовленные таблетки титана и сплава TH-1 (рисунок 3.7).

Полученная сборка размещалась в вакуумную печь и подвергалась температурной обработке:

- в случае пайки титаном в вакууме при температуре 1750 °C;

- при расплавлении никелида титана в среде аргона при температуре 1250 °С.

Полученные результаты представлены на рисунке 3.7, из которого видно, что расплав титана равномерно растекался по поверхности сплава ниобия, образуя каплю в виде сегмента шара.



Рисунок 3.7. Фото экспериментального образца после расплавления титана на поверхности сплава ниобия (а), проекция капли расплава (б) и схема измерения параметров (в) для расчета краевого угла смачивания θ.

В свою очередь, в случае плавления никелида титана происходило равномерное растекание его по всей торцевой поверхности ниобиевого цилиндра, что позволяет утверждать, что краевой угол смачивания этого сплава приближается к нулю.

Измерение краевого угла смачивания титаном поверхности сплава НбЦУ проводилось двумя методами:

- по методике, предложенной К. Симогаки с коллегами в работе [96];

- посредством графической программы SolidWorks, позволяющей при известных *d* и *h* построить сегмент сферы (капли) и определить угол наклона касательной прямой (рисунок 3.7,в).

В первом случае нами использована для расчета краевого угла смачивания *θ* формула [96]:

$$\theta = \arcsin \frac{d \cdot h}{\frac{d^2}{4} + h^2},$$

где *d*,*h* - диаметр основания и высота капли расплава припоя, соответственно.

После расчета всех полученных результатов значение краевого угла смачивания θ усреднялось. В ходе наших исследований выявлена хорошая растекаемость титана по поверхности сплава НбЦУ (рисунок 3.7,б) с краевым углом смачивания 7,5°. Данный результат позволил нам убедиться в правильности выбран-

110

ных материалов и рассчитать в соответствии с рекомендациями работы [95] оптимальные зазоры соединяемых деталей и диаметра отверстия 10 (рисунок 3.6).

Дальнейшие экспериментальные работы были направлены на исследование структуры спаев, полученных пайкой в указанных выше режимах. Основное внимание в наших исследованиях акцентировано на способе герметизации лампы после наполнения рабочим веществом. Ниже приведены результаты микрорентгеноспектрального анализа механизма взаимодействия расплава TH-1 с ниобием.

В качестве исследуемого образца использовалась ниобиевая трубка (наружный диаметр 3 мм, толщина стенки 0,3 мм), имеющая в центральной части пережим с внутренним зазором h = 0,1-0,5 мм. Для заплавления образовавшегося капилляра трубка располагалась вертикально и над пережимом размещалась таблетка из никелида титана. Эта конструкция помещалась в вакуумную печь ($p=5\cdot10^{-5}$ мм рт.ст.), где подвергалась термообработке при T = 1250 °C в течение 3 мин. Для анализа из трубки вырезалась заполненная расплавом зона пережима, из которой шлифовкой и полировкой до вскрытия ее стенок изготавливался исследуемый шлиф. Подробно методика подготовки образцов и микрорентгеноспектрального анализа приведена в работе [97].

Изучение интенсивности излучения рентгеновских спектральных линий, возбуждаемых под воздействием электронного пучка на исследуемые элементы шлифа, проводилось на микроанализаторе САМЕСА [97]. Сканирование исследуемых проб в поперечном направлении (ниобий - никелид титана - ниобий) производилось с апертурой электронного пучка диаметром 5 мкм.

На рисунке 3.8 представлено полученное в нашей работе распределение интенсивности рентгеновской *L* линии ниобия и *К* линий титана и никеля по поперечному сечению образца.

Правая и левая границы на рисунке 3.8,а соответствуют чистому ниобию, а центр диаграммы характеризует расплав. На приведенной рентгенограмме наблюдаются зоны с колебаниями интенсивности линий титана и никеля.

111



Рисунок 3.8. Распределение интенсивности рентгеновских линий никеля, титана, ниобия по поперечному сечению исследуемого спая (а) и второй фазы несимметричной формы (б).

Данное явление объясняется наличием неравномерного структурного состава переходной зоны.

Подтверждение сделанному предположению можно наблюдать на шлифе поперечного сечения запаянного нитинолом ниобиевого штенгеля. На фото (рисунок 3.9,б) четко наблюдается наличие переходной зоны с включениями прямоугольной формы, которые можно условно квалифицировать как вторую фазу Ti₂Ni [98]. Именно чередование основы расплава TH-1 и второй фазы при прохождении электронного зонда по диаметру поперечного сечения штенгеля определяет флуктуацию интенсивности рентгеновского излучения линий.

На рентгенограмме, приведенной на рисунке 3.8,6 наблюдаются также всплески интенсивности линий ниобия в переходной зоне. Такая картина, позволяет сделать заключение об интенсивном растворении ниобия в расплаве TH-1, причем зоны взаимодействия жидкого никелида титана и материала трубки на контактной границе различны. Из рисунка 3.8,а видно, что толщина нерастворенной в расплаве правой стенки составляет 100 - 125 мкм, а у левой стенки она равна 200 - 225мкм. Такой результат можно, предположительно, объяснить неравномерностью зазора между таблеткой припоя и стенкой ниобиевого штенгеля и, следовательно, различием во времени взаимодействия в зоне контакта ниобия и сплава. Механизм растворения ниобия в сплаве в обоих случаях идентичен, так как количественный анализ состава образовавшегося основного расплава на границе ниобия с никелидом титана дал одинаковый результат: Ni - 39%, Ti - 25%, Nb - 36%.

Насыщение расплава нитинола растворенным ниобием происходит неравномерно. Наличие второй фазы в переходном слое спая (рисунок 3.9,б) приводит к более интенсивному растворению ниобия в образовавшихся конгломератах.



Рисунок 3.9. Структура образовавшихся фаз при пайке никелидом титана в начале работы лампы (а) и по окончании срока службы (б).

Это предположение подтверждается флуктуацией интенсивности рентгеновских линий Ni, Ti, Nb при сканировании этих зон электронным пучком. Включения неправильной формы имеют переменный состав по сечению (см. рисунок 3.9,а), в то время как квадратные фазовые включения по составу постоянны: Ni - 29,8%, Ti - 21,3%, Nb - 48,9%.

В процессе наработки лампы продолжается движение атомов ниобия в структуру никелида титана, что приводит к исчезновению четких границ переходного слоя и укрупнению второй фазы в самом никелиде (см. рисунок 3.9,б)

Проведенный анализ позволяет сделать практический вывод о необходимости обеспечения строгого зазора между припоем и стенкой, а также вводит ограничения на толщину используемой стенки – не менее 0,3 мм.

Таким образом, в результате проведенного анализа всех воздействующих на спаи факторов (пары щелочных металлов и ртути, высокая температура и т.д.) доказано, что в качестве припоев для пайки электродных узлов, изготовленных из сплава НбЦУ, необходимо использовать титан и никелид титана (сплав TH - 1).

3.5. Разработка конструкции и технологии изготовления внешней оболочки и центрирующей арматуры

Внешняя оболочка лампы предназначена для стабилизации теплового состояния разрядной трубки и, как следствие, обеспечения соответствия параметров излучения эксплуатационным требованиям ОЭС. Для решения этих задач ее внутренняя полость заполнена газом – теплоносителем, например неоном [1, 4]. Учитывая высокую теплопроводность этого газа и его проницаемость, требования к спаям токоввода внешней оболочки с сапфиром являются достаточно жесткими. С другой стороны, для термостабилизации параметров необходимо обеспечить равномерный зазор между оболочками разрядной горелки и внешней колбы. При этом центрирующая арматура должна иметь конструктивное исполнение, исключающее высоковольтный пробой по неоновому наполнению.

3.5.1. Конструкция и технология токоввода внешней оболочки газоразрядной лампы

Для реализации конструкции токоввода внешней оболочке нами разработан способ вакуумно-дугового напыления титана на сапфировый баллон с последующей припайкой коварового (сплав 29НК) токоввода медью [68]. Выбор титана в качестве материала покрытия обусловлен его высоким химическим сродством к кислороду. Следовательно, можно ожидать образование вакуумноплотных соединений с окисью алюминия.

Использование титана в качестве элемента, взаимодействующего с алюмооксидной керамикой, было предложено при разработке метода активной пайки [79, 99, 100]. Припой, предназначенный для соединения керамики с металлом, представлял собой механически прижатые друг к другу три тонкие фольги в комбинации медь – титан – медь. Данный способ соединения кварцевого стекла или сапфира с металлом не получил широкого распространения в отечественном ламповом производстве в силу критичности надежности спая к величине зазора между сочленяемыми деталями. Однако, механизм взаимодействия титана с керамикой на основе окиси алюминия был достаточно подробно изучен [99,100].

При рассмотрении пайки сапфира медным припоем по поверхности титанового покрытия необходимо рассмотреть три аспекта. Во - первых, как взаимодействует титан с сапфиром, во – вторых, как происходит его реакция с расплавом меди и, в- третьих, как влияют режимы пайки на образование соединения титана с корундом.

В процессе воздействия титана на алюмооксидную керамику происходит разрушение решетки Al_2O_3 и диффузия обоих элементов (кислорода и алюминия) в титан [99]. Атомы кислорода, обладающие значительной подвижностью вследствие малого атомного радиуса (0,6 A), уже при температуре 1150 °C уходят с границы соприкосновения реагентов и проникают вглубь титана, растворяясь во всем его объеме. Алюминий же в связи со значительной величиной атомного радиуса (1,43 A) при указанной температуре проникает в титан на небольшую глу-

бину, сосредотачиваясь в близкой к керамике области. Это создает необходимые и достаточные условия для образования вблизи керамики твердого раствора *Ti* (*Al*, *O*) с предельной концентрацией алюминия и даже интерметаллического соединения *TiAl*. По мере повышения температуры прогрева подвижность атомов алюминия и кислорода растет, что приводит к значительному увеличению глубины проникновения титана.

Взаимодействие припоев с титаном подробно изучено в работе [100], в получены следующие основные результаты:

1. Образование твердых растворов припоя в титане способствует получению прочного спая. Отсюда предпочтение отдается припоям, обладающим хорошей взаимной растворимостью с титаном.

2. Независимо от материала припоя следует применять такие режимы пайки, при которых не образуется интерметаллиды титан-припой или использовать заранее выбранное соотношение титана и припоя. Припой в зоне спая активизирует процесс взаимодействия титана Al_2O_3 , облегчая взаимное перемещение атомов и образовывая интерметаллические соединения или твердые растворы с титаном.

Использование меди в качестве припоя удовлетворяет всем перечисленным требованиям.

Из приведенных выше результатов работ следует, что при конструировании спая сапфир – металл важно знать массовое соотношение припой титан. Авторы работы [100] нашли, что прочность спаев керамики, полученных титановомедным припоем, уменьшается с увеличением количества титана. В связи с этим они не рекомендуют применять припой с содержанием титана свыше 20%.

Режим пайки связан с физико-химическими процессами в спае таким образом, что каждой температуре должно соответствовать оптимальное количество титана, которое идет на связь с керамикой с учетом небольшой добавки, необходимая для образования твердого раствора титана в припое. При достаточно высокой температуре пайки оптимальное количество титана будет так мало, что спай практически невозможно обеспечить. С повышением температуры пайки возрастает интенсивность взаимодействия титана с сапфиром, что может привести к чрезмерному увеличению количества продуктов реакции, которые ослабляют спай. Взаимодействие титана с корундом должно быть таким, чтобы связь с керамикой была достаточно прочной, но при этом образовалась минимальное количество продуктов реакции.

Из теории спаев [79] следует, что взаимодействие титана с сапфиром будет тем интенсивнее, чем плотнее контакт металла и корунда. Поэтому наилучшие результаты можно ожидать при использовании процессов напыления титана на сапфир. Кроме этого, нами был применен конический спай [101] (см. рисунок 3.10), который позволяет под тяжестью вертикально расположенной оболочки 1 и токоввода 2 при расплавлении припоя 4 обеспечить оптимальный зазор и плотность контакта деталей для пайки.





Рисунок 3.10. Схема конусного спая. 1 – сапфировая оболочка, 2 – герметизирующий элемент токоподвода, 3 – титановое покрытие, 4 – металлический (медный) припой. Рисунок 3.11. Температурно - временная диаграмма пайки медью сапфира с ламповым тоководом из сплава 29НК.

Вакуумно-дуговое напыление широко используется для нанесения металлических и диэлектрических покрытий [102]. Суть этого метода заключается в конденсации на изделие материала из плазменных потоков, генерируемых катодным пятном (мишенью) при горении сильноточной вакуумной дуги. В наших экспериментах титановое покрытие наносилось на установке вакуумно-дугового напыления УВНИПА-1-001 при напряжении U = 750 В в течение 2 часов. В качестве мишени использовался титановый сплав ВТ1-0. Сапфировый баллон устанавливался в вакуумную камеру установки на специальном приспособлении, позволяющем четко выделить требуемую для покрытия титаном поверхность. Для улучшения адгезии напыляемого слоя предварительно рабочая зона корунда подвергалась ионному травлению тлеющим разрядом. Толщина нанесенного слоя h определялась расчетным путем по электрическому сопротивлению корундовой пластинки фиксированных габаритных размеров, которая при напылении располагалась вблизи металлизируемой поверхности. В наших экспериментах толщина металлизированного слоя h составила 20±5 мкм.

Известно [101], что для упорядочения структуры и уменьшения внутренних механических напряжений пленок, повышения стабильности их свойств и улучшения адгезии к поверхности изделий необходимо производить отжиг при температурах незначительно превышающих температуру поверхности при напылении. По нашим оценкам температура покрытия в процессе напыления составляла 400±50°C. Поэтому в технологический цикл пайки медью коварового токоввода (колпачка) была введена выдержка в течение 10 мин. при температуре 700 °C (см. рисунок 3.11.). Пайка происходила в вакууме (5·10⁻⁵ мм.рт.ст.) при температуре 1120°C. Температурная выдержка при 1000 °C необходима, в первом случае, для равномерного прогрева соединяемых деталей, а во втором - для релаксации напряжений в спае.

В работе были исследованы спаи с конусным углом $\alpha = 2 \div 10^{\circ}$. Диапазон вариации угла конусности связан с анизотропией тепловых свойств сапфира, т.е. по мере роста α (см. рисунок 3.10) происходит изменение КТР кристалла. Внешний вид, полученных образцов оболочек ламп, приведен на рисунке 3.12.

118



Рисунок 3.12. Внешний вид экспериментальных образцов оболочек разрядных ламп.

В наших экспериментах масса фольговой меди марки МО (ГОСТ 859-2001) выбиралась таким образом, чтобы массовая доля титана в соединении не превышала 20%. После пайки все образцы подвергались термоциклированию в диапазоне от -60°C до +80°C. Контроль герметичности осуществлялся посредством масс- спектрометрического течеискателя MC-3.

Из полученных оболочек были изготовлены лампы, которые подверглись испытаниям на безотказность в циклическом режиме (2часа - работа, 15 мин. - отключение) при электрической мощности 1,5 кВт. Такой метод позволил подтвердить работоспособность спая в течение всего срока службы лампы - 225 часов. После проведения испытаний ламп на устойчивость к одиночным ударам (40g) и синусоидальной вибрации (2000 Гц) спай сохранил целостность и герметичность.

Учитывая, что описанная оболочка лампы была наполнена неоном, обладающего высокой проникающей способностью, после проведения указанных испытаний можно с уверенностью утверждать о правильности выбранных технических решений.

3.5.2. Особенности конструкции центрирующей арматуры внешней колбы

Роль центрирующей арматуры была освящена в начале данного раздела. В то же время выбор ее конструкции обусловлен достаточно сложными процессами,

происходящими в лампе с двумя сапфировыми оболочками. Фактически конструктивное исполнение лампы можно рассматривать как две параллельно соединенные лампы: одна наполнена щелочными металлами, другая неоном. В зависимости от сопротивления каждой из них вероятность пробоя наиболее велика в случае наименьшего сопротивления разрядного промежутка. Для «неоновой» лампы электродами являются металлические элементы конструкции центрирующей арматуры (экраны), которые для обеспечения устойчивости к вибрационным и ударным нагрузкам механически соединены с токовводами разрядной трубки (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13. Конструкция центрирующего элемента

 1 – разрядная оболочка, 2 – катодный узел, 3 – внешняя оболочка, 4 – металлический экран, 5 – зона примыкания с образованием теплового контакта экрана и токоввода, 6 – внутренняя полость, 7 – сквозной канал, соединяемый с разрядным пространством.



Рисунок 3.14. Конструкция центрирующего элемента с изолирующим кольцом 1 – разрядная оболочка, 2 – электродный узел, 3 – внешняя оболочка, 4 – изоляционный элемент, 5 – металлический цилиндр, 6 – металлический диск с отверстием, 7 – токоввод электродного узла, 8 – ступень металлического цилиндра.

По этой причине при разработке лампы необходимо обеспечить надежный электрический контакт горелки и токоввода внешней колбы, исключить возмож-

ность пробоя между оболочками, при этом сохранив способность удлинения и перемещения разрядной трубки при нагреве внутри внешней колбы.

Исключение пробоя между оболочками проводилось двумя способами. Во – первых подбором давления ксенона в разрядной трубке, а во – вторых увеличением расстояния между экранами 4 (рисунок 3.13).

Использовать последовательный поджиг для зажигания разряда в лампах с двумя оболочками можно только при давлении ксенона в разрядной трубке 50-70 мм рт. ст. При большем давлении ксенона становится возможным импульсный пробой и последующее зажигание разряда в неоне между оболочками. Для проверки этого предположения были изготовлены лампы 7/90 с цезиевым наполнением и различными давлениями буферного газа-ксенона. Пространство между оболочками заполнялось неоном давлением 700 мм рт. ст. Кроме этого у одной лампы горелка была вакууммирована до 10^{-5} мм рт.ст. для проверки критического напряжения пробоя по неону. Перед каждым измерением с целью испарения возможной пленки производился ВЧ - прогрев разрядной части горелки до получения $R_n>150$ кОм. Исследования импульсного зажигания проводились на установке, схема которой приведена в главе 2. Результаты экспериментов сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1.

Параметр	Пробой по неону между	Пробой разрядной трубки при давлении ксенона, мм рт.ст			
1 1	оболочками	50	100	150	200
Минимальное					
напряжение	12	8	11	14	16
пробоя, кВ					

Минимальное напряжение пробоя по неону при различных давлениях ксенона в горелке

Минимальное значение напряжения пробоя разрядной трубки составляет 8 кВ. При увеличении давления буферного газа до 100 мм рт. ст. велика вероятность возникновения разряда по неону между оболочками. Поэтому в дальнейших

экспериментах исследовалось зажигание ламп с давлением ксенона во внутренней оболочке 50 мм рт. ст.

Способом увеличения расстояния между экранами является представленная на рисунке 3.14 конструкция центрирующего экрана, электрически изолированного от токоввода разрядной трубки.

Нами предложена конструкция газоразрядной лампы, которая содержит разрядную оболочку 1 из лейкосапфира, на противоположных концах которой установлены электродные узлы 2 (на рисунке 3.14 показан только один из них), и размещенную в защитной корундовой оболочке 3. В кольцевой полости между оболочками 1 и 3 установлены равноудаленные от них экраны, охватывающие оболочку 1 в зоне размещения электродных узлов. Один из них (рисунок 3.14) выполнен составным в виде примыкающих через изоляционный элемент 4 соосных между собой деталей 5 и 6. Изоляционный элемент 4 выполнен в виде кольца из твердого диэлектрического материала с высоким коэффициентом теплопроводности, например, алюмооксидной керамики А-995 [79]. Внутренний диаметр кольца 4 выполнен равным диаметру токоввода 7 электродного узла 1 в зоне их примыкания. Внутренняя поверхность полого металлического цилиндра 5 снабжена кольцевой ступенью 8, примыкающей к торцу оболочки 2. Металлический диск 6 снабжен сквозным осевым отверстием, в котором жестко установлен токоввод 7 электродного узла 1. Жесткое соединение деталей 6 с токовводом 7 может быть обеспечено одним из известных способов – обжим, пайка, сварка. На противоположных концах защитной оболочки 3 установлены сопряженные с герметизирующими элементами токовводы, которые находятся в электрическом контакте с токовводами электродных узлов. В данной конструкции выполненный в виде кольца изоляционный элемент 4 выполняет две функции – во-первых, он обеспечивает пространственную фиксацию детали 5 в кольцевой полости между оболочками 1 и 3, а во-вторых, изолирует деталь 5 от электрического контакта с токовводом 7. Предлагаемая конструкция цезиевой ГРЛ за счет электроизоляции одного из экранов 5 полностью исключает возможность разряда в кольцевой полости между оболочками 1 и 3 при любых режимах эксплуатации газоразрядной лампы. Поэтому при функционировании лампы в циклическом режиме поступающая к электродным узлам электрическая энергия идет исключительно на преобразование проводящей пленки цезия на межэлектродном участке оболочки 1 в газообразную фазу и разряд происходит только в плазмообразующей среде межэлектродного пространства.

В заключение данной главы необходимо отметить, что в ней были рассмотрены основные конструктивные и технологические решения, разработанные в данной диссертации и используемые в опытном производстве лампы СП4-1500. Подробно с другими конструкторско - технологическими результатами, полученными коллегами Гавришем С.В., Пучниной С.В. и Петренко Н.Ю. применительно к разработанной лампе можно ознакомиться в их работах, ссылки на которые приведены в библиографическом списке данной диссертации.

ГЛАВА 4. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННЫХ ЛАМП

Рассмотренные в предыдущих главах результаты расчетно – экспериментальных и конструкторско – технологических исследований позволили разработать базовую конструкцию новой лампы на основе импульсно – периодического разряда в парах цезий – рубидий – ксеноновой смеси. В то же время остаются вопросы о возможности использования разработанной газоразрядной лампы в составе ОЭС. Для этого необходимо изучить:

• влияние на характеристики предлагаемого импульсного источника ИК излучения параметров электрического питания;

• надежность разработанных ламп в условиях воздействия механических и климатических воздействий;

 стабильность электрических параметров и характеристик ИК излучения при быстром (менее 2 секунд) изменении пространственного положения лампы.
Решению перечисленных задач посвящена данная глава.

> 4.1. Характеристики излучения газоразрядной лампы в различных режимах электрического питания

Основная задача выбора режимов электрического питания заключается в поиске компромисса между параметрами импульса напряжения (амплитуда и длительность), которые позволят получить характеристики инфракрасного излучения газоразрядной лампы (пиковую силу и длительность импульса, глубину модуляции), обеспечивающие эффективное функционирование ОЭС.

4.1.1. Влияние на пиковую силу излучения длительности импульса напряжения

Как отмечалось в работе [103], длительность импульса напряжения, обеспечиваемая временем открытия транзисторного ключа ТК1 (рисунок 2.2) при подаче команды от генератор задающих импульсов ГЗИ1, формирует длительность импульса излучения. В то же время, формирование импульса тока, а именно, достижение квазистационарной стадии разряда, зависит от продолжительности «разогрева» плазменного канала. При коротком временном интервале приложения напряжения к лампе импульс тока, и как следствие, импульс излучения будет иметь значение, пропорциональное температуре разряда, достигнутой к этому моменту. Поэтому исследование зависимости пиковой силы излучения в диапазонах 1 и 2 от длительности прикладываемого к лампе напряжения является актуальной задачей.

В наших исследованиях была использована схема электрического питания газоразрядной лампы, представленная на рисунке 2.2,а. Во всех изучаемых случаях напряжение на лампе составляло 120В, что соответствует штатным режимам работы серийной лампы СП2-1500 в ОЭС. В эксперименте использовались два типа ламп с разрядом в цезий – калий – ксеноновой и цезий – рубидий – ксеноновой смесях. При этом каждый из указанных типов газоразрядных источников имел два различных состава наполнения: 2 мг калия (или рубидия) - 6 мг цезия и 6 мг калия (или рубидия) - 2 мг цезия. Давление пускового газа ксенона во всех исследуемых лампах составляло 70 мм рт.ст.

На рисунке 4.1 представлены экспериментальные результаты изучения пиковой силы излучения в зависимости от длительности импульса напряжения для различных составов наполнения. Компоненты наполнения играют важную роль в формировании пикового значения импульса тока (излучения), так как теплопроводность образовавшейся плазмообразующей среды влияет не только на параметры импульса, но и глубину модуляции.

Из полученных зависимостей можно сделать следующие заключения:

1. Пиковая сила излучения в спектральном диапазоне 1 достигает значения 125 Вт/ср при длительности импульса напряжения 260 мкс. При этом увеличение содержания калия или рубидия в составе плазмообразующей среды приводит к плавному росту пиковой силы излучения в этом диапазоне (рисунок 4.1,6).

2. Наблюдаемое аномальное поведение (наличие минимума) кривых 2 и 3 на рисунке 4.1,а связано с переходом к разряду в ненасыщенных парах. Такой же ход кривых 2 и 3 наблюдается на рисунках 4.1,в,г для спектрального диапазона 2.

Увеличение содержания калия или рубидия в составе плазмообразующей среды сглаживает ход кривых 2 и 3.









Рисунок 4.1. Зависимости пиковой силы излучения в спектральных диапазонах 1 и 2 от длительности импульса напряжения, прикладываемого к газоразрядным лампам со следующими составами плазмообразующей среды: 6 мг Rb - 2 мг Cs (а,в - кривая 3), 6 мг K - 2 мг цезия (а,в - кривая 2), 2 мг K - 6 мг Cs (б,г - кривая 2), 2 мг Rb - 6 мг Cs (б,г - кривая 3). На всех графиках кривая 1 относится к серийной лампе СП2-1500.

При этом как следует из рисунка 4.1,г зависимость пиковой силы излучения разряда в смеси рубидия с цезием нарастает параллельно с кривой 1, измеренной для серийной лампы СП2-1500, но при этом пиковая сила излучения во всем диапазоне изменения длительностей в 1,3 раза выше.

Таким образом, в заключении данного раздела можно сделать вывод, что используя взамен серийной лампы источник ИК излучения с разрядом в цезий– рубидий-ксеноновой смеси (2мг Rb, 6мг Cs и 70 мм. рт. ст. Xe) можно при одинаковой мощности разряда повысить интенсивность излучения ОЭС в 1,3 раза.

4.1.2. Влияние на пиковую силу излучения амплитуды импульса напряжения

Другим параметром, определяющим силу излучения, является напряжение, прикладываемое к газоразрядной лампе в течение интервала времени, необходимого для эффективного функционирования ОЭС. В наших исследованиях для изучения влияния величины напряжения на пиковую силу излучения в спектральных диапазонах 1 и 2 использовалась электрическая схема (рисунок 2.2,а), обеспечивающая работу лампы в режиме импульсно – периодического следования однополярных импульсов тока (рисунок 2.2,б). Напряжение на лампе регулировалось блоком преобразователя Пр, а длительность импульса напряжения *t*_{сен.}=200мкс фиксировалась временным интервалом открытия ключа ТК1. Методика исследований и состав наполнения испытываемых ламп был аналогичен, описанному в разделе 2.1.2.

Полученные результаты представлены на рисунке 4.2. Из представленных на рисунке данных следует:

1. Во всем интервале следуемых напряжений от 80 до 120 В (характеристики серийной ОЭС) газоразрядные лампы с Cs – Hg – Xe и K – Cs – Xe наполнением обеспечивалась стабильность пиковой силы излучения слинейным нарастания при увеличении напряжения.

2. Нелинейность (рисунок 4.2,б-г) зависимости *I*_{пик} у Rb – Cs – Хе лампы, предположительно, связана с теплофизическими процессами, а именно, с



Рисунок 4.2. Зависимости пиковой силы излучения в спектральных диапазонах 1 и 2 от напряжения, прикладываемого к газоразрядным лампам со следующими составами плазмообразующей среды: 2 мг Rb - 6 мг Cs (а,в - кривая 3), 2 мг K - 6 мг Cs (а,в - кривая 2), 6 мг Rb - 2 мг Cs (б,г - кривая 3), 6 мг K - 2 мг цезия (б,г - кривая 2). На всех графиках кривая 1 относится к серийной лампе СП2-1500.

128

флуктуацией давления компонентов при испарении сплава рубидия с цезием.

3. Как видно из рисунка 4.2,6 в спектральном диапазоне 1 разряд в Cs – Rb – Xe смеси незначительно уступает по силе излучения Cs – Hg – Xe лампе. Однако, как следует из работы [1], для обеспечения эффективного функционирования ОЭС в спектральном диапазоне 1 требуется около 90 Вт/ср. Поэтому полученный результат (125 Вт/ср) можно считать удовлетворительным. В то же время, в спектральном диапазоне 2 при достижении напряжения 120В лампа с разрядом в Cs – Rb – Xe смеси имеет незначительное преимущество (в 1,05 раз) по пиковой силе излучения перед серийной лампой СП2-1500.

Таким образом, для обеспечения стабильности излучательных характеристик ОЭС необходимо использовать в составе системы лампу с К – Cs – Хе наполнением, работающую при напряжении 120В.

4.2. Модуляционные характеристики разработанной лампы

Как отмечалось ранее, основной характеристикой газоразрядной лампы для ОЭС в спектральных диапазонах 1 и 2 является глубина модуляции, рассчитываемая по формуле: $m = [I - I_n)/I] \cdot 100\%$, где I - пиковая сила излучения, а I_n постоянная (немодулируемая составляющая) сила излучения лампы. Данный параметр определяется режимами импульсно – периодического электрического питания (напряжение и длительность импульса напряжения, несущая и огибающая частоты и т.д.) и условиями эксплуатации (скорость и расход воздушного охлаждающего воздушного потока, возврат в плазму собственного излучения, отраженного формирующей поток системой и т.д.) газоразрядной лампы, а также теплофизическими процессами в плазмообразующей среде и оболочках, ограничивающих разряд. Подробно все воздействующие факторы приведены на рисунке 1.20.

В продолжение исследованиям, выполненным в разделах 4.1.1 и 4.1.2, нами было изучено влияние параметров электрического питания $t_{ген}$ и U_{π} на глубину модуляции *m*. Полученные результаты сведены в таблицы 4.1 и 4.2.

129

	<i>m</i> , %					
<i>t</i> ген, мкс	6 мг К, 2 мг Сs	2 мг К, 6 мг Сs	2 мг Rb, 6 мг Cs	6 мг Rb, 2 мг Cs	Серийная лампа СП2-1500	
80	98	93	96	97	94	
100	98	97	96	98	95	
140	97	97	96	98	95	
180	96	96	96	98	95	
220	95	93	97	97	95	

Зависимость глубины модуляции от длительности импульса напряжения

Анализ таблицы 4.1 показывает, что в случае разряда в парах цезия с калием наблюдается флуктуация величины *m* в диапазоне от 93 до 97 %. Данный эффект связан колебаниями пиковой силы излучения, обусловленной теплофизическими процессами испарения компонентов из калий - цезиевого сплава. В тоже время в случае рубидий – цезиевого разряда наблюдается корреляция этого параметра с данными для серийной лампы СП2-1500. При этом изменение напряжения на газоразрядных лампах не изменяет сложившуюся ситуацию. Из таблицы 4.2 видно, что при увеличении напряжения глубина модуляции качественно совпадает с данными таблицы 4.1.

Таблица 4.2

	<i>m</i> , %					
<i>U</i> л, В	6 мг К, 2 мг Сs	2 мг К, 6 мг Cs	2 мг Rb, 6 мг Cs	6 мг Rb, 2 мг Cs	Серийная лам- па СП2-1500	
80	95	96	95	96	95	
90	96	94	95	96	95,5	
100	96	97	96	95	95	
110	96	96	96	96	95,5	
120	95	93	97	97	96	

Зависимость глубины модуляции от пикового значения импульса напряжения

Понятно, что глубина модуляции зависит от нагрева и остывания плазмы в течении времени приложения напряжения. Данные факторы, также определяют эффективность работы ОЭС, так как чем больше фронты импульса излучения приближаются к вертикали, тем более он схож с импульсами управления, формируемыми в системе наведения ГСН.



Рисунок 4.3. Временные зависимости импульса тока от пикового значения импульса напряжения 90В (а) и 120В (б), прикладываемого к газоразрядным лампам со следующими составами плазмообразующей среды: 6 мг К - 2 мг Cs (1), 6 мг Rb - 2 мг цезия (2), серийная лампа СП2-1500 (3), 2 мг Rb - 6 мг Cs (4), 2 мг К - 6 мг Cs (5).

На рисунке 4.3 представлены осциллограммы тока всех исследованных ламп при напряжениях 90В и 120В. Из приведенных данных видно, что лампы с Cs – Rb – Хе наполнением имеют более крутой передний фронт импульса тока, и как следствие импульса излучения, что свидетельствует о более высокой скорости нагрева плазмообразующей среды.

Таким образом, можно сделать вывод, что при замене серийной лампы СП2-1500 на источник ИК излучения с Cs – Rb – Хе наполнением в излучателе ОЭП, можно сохранить без изменения режимы импульсно - периодического электрического питания и условия эксплуатации, имеющиеся в системе.

4.3. Сравнение разработанной лампы с отечественным аналогом

В настоящее время за рубежом для защиты летательных аппаратов от ракет нового поколения разработаны ОЭС (AN/ALQ-123 и AN/AAQ-4),

использующие импульсную цезиевую лампу с двумя сапфировыми оболочками. По экспертным оценкам такая лампа должна обеспечивать максимальную амплитуду импульса ИК сигнала более *A*=40 Вт/ср и глубину модуляции не менее *m*=95% в спектральном интервале 2 при средней потребляемой мощности не более 3 кВт. Проведенные нами патентно – информационные исследования не выявили сведений о других технических характеристиках и конструктивных решениях зарубежной газоразрядной лампы.

В России для использования в составе ОЭС защиты летательных аппаратов разработаны два типа импульсных источника ИК излучения (СП2-1500 и СП3-1500, ТУ 6343-005-07616187-02), отличающиеся между собой габаритно – присоединительными размерами. По результатам проведенных в диссертации исследований, была разработана конструкторская документация на калий – цезий – ксеноновую лампу (СЛНП.433222.049), присвоен индекс СП4-1500, изготовлена и испытана опытная партия указанного импульсного источника ИК излучения и выпущены технические условия ТУ 6364-008-77534031-2016.

Таблица 4.3

	Букв.	Тип лампы	
паименование параметра, единица измерения	Обозн.	СП2-1500	СП4-1500
1 Сила излучения пиковая, в спектральном диапа- зоне 2, Вт/ср	I пик	40	50
2 Коэффициент глубины модуляции в спектральном диапазоне 2 при средней мощности 1500 Вт, %	т	95	97
3 Длительность импульса излучения по уровню 0,5 в спектральном диапазоне 2, мкс	to.5	160	170
4 Время готовности, мин	t_{rot}	5	
5 Пиковое напряжение импульса зажигания, изме- ренное на нагрузке 10 кОм, кВ	U ₃	10	
6 Запасенная энергия импульса зажигания, Дж	W ₃	1,0	
7 Частота следования импульсов зажигания, Гц	$f_{3\Gamma}$	1	0
8 Время подачи импульсов зажигания, с	t _{3r}	1	0

Электрические и параметры излучения серийной лампы СП2-1500 и разработанной лампы СП4-1500 Разработанная лампа СП4-1500 по параметрам инфракрасного излучения превосходит указанные отечественные аналоги, о чем свидетельствует сводная таблица 4.3.

4.4. Исследование надежности разработанной лампы СП4-1500

Для источников излучения, предназначенных для использования в изделиях специального назначения, в качестве критериев надежности государственные стандарты определяют следующие характеристики:

 коррозионная стойкость - устойчивость к воздействию повышенной влажности;

 механическая прочность - способность сохранять параметры после воздействия вибрации и одиночных ударов;

• термическая стойкость – устойчивость к повышенной или пониженной температуре и ее циклическому изменению.

• минимальная наработка (долговечность) лампы - срок службы до отказа;

Испытание на вибропрочность проводились на вибростенде УВЭ-10/5000 с целью проверки работоспособности лампы противостоять действию вибрации в условиях синусоидальной вибрации качающейся частоты в диапазоне 100 – 2000 Гц. Во всем диапазоне частот поддерживалась постоянная амплитуда ускорения 100 м/с² (10 g). По завершению 10 циклов качания частоты исследовались параметры критерии годности (пиковая сила, длительность импульса и глубина модуляции излучения).

Испытания на ударную прочность выполнялись на ударном стенде МУ-50/1470 для проверки способности газоразрядной лампы противостоять разрушающему действию многократных механических ударов, обеспечивающим с длительностью действия ударного ускорения 250 м/с²(25g) при общем количестве ударов 12000.

Испытание на воздействие одиночных ударов проводились с целью определения возможности газоразрядной лампы сохранять свои функции после

воздействия одиночных механических ударов на стенде МУ-50/1470 с пиковым ударным ускорением 400 м/с² (40g.

Испытание на воздействие пониженной температуры среды при эксплуатации выполнялись в следующей последовательности. Лампу помещали в камеру холода ТВ-200, после чего в камере устанавливают температуру, равную минус (60±3)°С и выдерживают при этой температуре 2 ч. По истечении выдержки лампу извлекают из камеры и не позднее 15 мин после извлечения проверяют параметры-критерии годности. Внешний вид лампы проверяют через 1 час после выдержки в нормальных климатических условиях

Испытание на воздействие изменения температуры среды проводят с целью определения способности газоразрядной лампы сохранять свой внешний вид и параметры после воздействия изменения температуры среды. Исследования выполнялись в следующей последовательности. Лампу помещали в камеру холода ТВ-200и выдерживали 2 ч при температуре минус (60±3)°С, а затем в течение времени не более 2 мин. переносили в камеру тепла КТ-0,05-315М, температура в которой установлена равной (85±3)°С, и выдерживали при этой температуре 2 ч. Количество циклов воздействия – 3.

Испытание на воздействие повышенной влажности воздуха. При начальных и заключительных проверках и измерениях проводят визуальный контроль лампы и измерение параметров-критериев годности.

Лампу помещают в камеру влаги, температуру в которой устанавливают равной 40° C – при длительных испытаниях и 55° C – при ускоренных испытаниях, и выдерживают при этой температуре в течение 1 суток. Затем относительную влажность воздуха повышают до $(93\pm3)^{\circ}$, после чего температуру и влажность в камере поддерживают постоянными в течение 21 суток при длительных испытаниях и 6 суток при ускоренных испытаниях. Измерение параметров-критериев годности проводят не позднее 15 мин после извлечения лампы из камеры. Внешний вид и коррозионные поражения проверяют после выдержки лампы в нормальных климатических условиях в течение 1 суток.

Испытание на воздействие атмосферного пониженного давления при эксплуатации. При выполнении исследований лампу помещают в барокамеру, давление в которой устанавливают равным 100 гПа (74 мм рт. ст.), и выдерживают в течение 1 часа. Не позднее 15 мин после извлечения лампы из камеры, на лампу подают импульсы зажигания с параметрами, указанными в 1.3.5 в течение 1 мин и визуально контролируют отсутствие электрического пробоя на поверхности лампы.

Во всех видах испытаний лампу считают выдержавшей испытания, если в процессе воздействия пониженного давления отсутствуют электрические пробои по поверхности лампы и при заключительных проверках внешний вид, параметры-критерии годности ламп соответствует требованиям конструкторской документации и требованиям ТУ на лампу СП2-1500.

Минимальная наработка. На завершающем этапе проводились испытания на долговечность. Лампа считалась годной, если работала без отказа в течение 175 часов. При этом в течение срока службы лампа должна выдерживать не менее 50 включений. Испытания проводились на экспериментальном источнике питания (рисунок 2.2) при следующем режиме работы: мощность на лампе 1,5 кВт, средняя частота следования импульсов 425 Гц, напряжение на лампе 120В, длительность импульса напряжения 260 мкс. Источник работал в циклическом режиме: 4 часа- включено, 15 мин.- выключено. В результате две лампы отработали без отказа в указанных режимах 250 часов, одна - 150 часов. Визуальный контроль внешнего вида лампы после испытаний показал потемнение внутренней поверхности разрядной трубки. Для анализа состава налета (предположительно: распыление электродов, ниобиевых деталей, титан-никелевых таблеток и т.д.) был проведен спектральный анализ пленки, который показал наличие вольфрамового покрытия на поверхности разрядной трубки, т.е. распыление электродов. В дальнейшем для увеличения срока службы потребуется более тщательный, чем в данной диссертации, расчет катодного и анодного узлов.

Таким образом, в результате комплекса испытаний на устойчивость к механико – климатическим воздействиям и на минимальную наработку получено подтверждение правильности предложенных в работе технических решений, а конструкцию и технологию изготовления лампы необходимо считать базовой при разработке нового класса импульсных источников ИК излучения на основе Cs – Rb - Хе разряда.

4.5. Стабилизация параметров разряда при изменении пространственного положения газоразрядной лампы

Функционирование ОЭС предполагает узконаправленное оптическое воздействие на объект, который за доли секунды может изменить свое пространственное положение по отношению к ЛА, на котором размещена система с газоразрядным источником ИК излучения. По этой причине для сохранения эффективности противодействия ОЭС необходимо, чтобы при быстром повороте ОЭС в направлении объекта газоразрядная лампа сохраняла неизменными свои электрические параметры и характеристики излучения.

4.5.1. Анализ теплофизических процессов в плазме смеси металлов при изменении пространственного положения газоразрядной лампы.

В установившемся режиме работы газоразрядной лампы формируется некоторое определенное и стационарное тепловое поле горелки, включая температуру холодной точки и электродов, в результате воздействия импульсно - периодического подвода тепла из плазмы и потерь излучением и теплопроводностью. Стационарность этого процесса обусловлена тем, что теплоемкость сапфировой трубки велика, поэтому изменение температуры от воздействия одного импульса очень мало.

Кроме этого в разрядном объеме устанавливается равновесное пульсирующее распределение концентрации тяжелых частиц (атомов цезия, ртути и ксенона). Это сложный процесс, так как он определяется сразу несколькими факторами, главными из которых являются $T_{x.m.}$ и температура нагретого газа в импульсах. Температура холодной точки определяет среднюю по объему и по времени концентрацию атомов цезия и ртути, так как поток атомов Cs и Hg из объема на поверхность холодной точки равен в установившемся режиме потоку атомов с поверхности конденсированной амальгамы. Поток атомов на поверхность х.т. определяется их концентрацией непосредственно над поверхностью амальгамы и температурой холодной точки. Концентрация при этом меняется во времени с момента включения разряда. Разогрев плазмы (при ЛТР, которое быстро достигается в плазме, $T_e = T_i = T_a$) приводит к соответствующему росту давления в разрядном объеме. Повышение давления, которое максимально на оси разрядного канала, должно вызывать перенос тяжелой компоненты из центра горелки к стенкам и в заэлектродное пространство. После окончания серии импульсов плазма в межэлектродном промежутке остывает и распадается, давление падает, и потоки тяжелых частиц идут в обратном направлении. Следовательно, полное число атомов цезия и ртути в горелке постоянно в случае, если его усреднить по времени за период следования импульсов. Поэтому от того, какое будет распределение атомов в горелке перед приходом следующего импульса, будут зависеть характер и время развития разряд.

Кроме разогрева в импульсе, на распределение тяжелой компоненты дополнительно влияют еще два фактора – это катафорез и конвекция. Катафорез действует, как и разогрев, только в период прохождения импульса тока. Большой ток и значительный энерговклад (высокая степень ионизации) делают перенос ионов цезия весьма существенным. Рекомбинируя ионы создают в разряде избыток атомов цезия, который снижается в паузе между импульсами за счет диффузии к стенке через атомы ртути (и ксенона), число которых существенно больше из-за высокого парциального давления паров Hg. Диффузия является медленным процессом, поэтому концентрация атомов по радиусу разрядной трубки не успевает выровняться за время паузы между сериями импульсов. Поэтому, по-видимому, существует некоторый избыток атомов цезия в центре разряда за счет катафореза перед первым импульсом следующей серии.

Конвекция значительно слабее воздействует на перенос тяжелой компоненты в сравнении с катафорезом, но существует в течение всего времени работы газоразрядной лампы. Она определяется градиентом температуры плазмообразующей среды и потому максимальна в момент прекращения разогрева плазмы (в максимуме тока). В паузе между серией импульсов конвекция не прекращается, так как градиенты температур становятся меньше и определяются температурным полем разрядной трубки и электродов. Поэтому конвекция является единственным фактором, полностью зависящим от ориентации горелки.

Расчетные результаты работ [9] показывают, что в расположенной вертикально горелке поток атомов по центру разряда идет снизу вверх и сверху вниз – у стенок. Очень существенно при этом, что радиальное распределение параметров плазмы при этом не нарушается. В случае расположения катода наверху, конвекционный поток складывается с ионным потоком от положительного столба, при обратном положении – вычитается. При горизонтальном положении максимально разогретый плазменный канал обуславливает поток от оси разряда вверх и по стенкам трубки – вниз. Наиболее сильный поток в середине горелки, поэтому плазменный канал изгибается. При этом меняется поток частиц на стенку, отвод на нее тепла, ускоряется амбиполярная диффузия при распаде плазмы и т.д. Поэтому во всех рассмотренных случаях происходит радиальное перемешивание плазмы, которое негативно влияет на разряд.

4.5.2 Стабилизация параметров излучения газоразрядной лампы посредством двухполярного электрического питания

На основании изложенной в разделе 2.4.1 физической картины теплофизических процессов в качестве конкретных возможных причин уменьшения мощности разряда можно предположить две причины, Во – первых, изгиб разрядного канала в горизонтальном положении с касанием стенки горелки, в результате чего увеличиваются потери ионов на стенку, ускоряется амбиполярная диффузия при распаде плазмы, и, в конечном счете, уменьшается концентрация остаточной плазмы перед приходом новой серии импульсов, что увеличивает время зажигания. Во – вторых, что при вертикальном положении горелки катодом вверх, предположительно, конвекция и катафорез складываются и обеспечивают более высокую концентрацию атомов у катода, которая улучшает условия поджига и уменьшает задержку.

4.5.2.1. Расчетно – теоретическое обоснование стабилизации параметров лампы за счет двухполярных импульсов напряжения

В цезиевой дуге с катодным пятном катодное падение потенциала по литературным данным $U_k = 6-7$ В [9]. В случае приложения к лампе однополярного электрического питания газоразрядной лампы значительная часть энергии $(I \cdot U_k)$, выделяющейся при разрядном токе I на катодном барьере, расходуется на разогрев катода, и это тепло надо снимать. На аноде с электронным током выделяется энергия $I \cdot (\chi_a + 2kT_e)$, (где χ_a – работа выхода анода, , T_e - температура электронов на оси положительного столба), в рассматриваемых режимах анодный барьер мал и для грубой оценки им можно пренебречь. Основной вклад в разогрев анода обеспечивает потенциальная энергия поступающих на анод электронов χ_a . Так при рабочих давлениях цезия работа выхода вольфрамового электрода будет составлять около 2эВ, дополнительно необходимо прибавить еще около 1эВ дза счет кинетической энергии. Поскольку температура электронов на оси положительного столба T_e близка к 6000 К, то можно ожидать, что работа выхода составит около 0,5 эВ. При среднем токе 150 А, общей длительности серии импульсов ~ 200 мкс и частоте следования 1 кГц потери на нагрев анода составят примерно 100 Вт. Такая же величина энергетических потерь будет в катодном пятне.

В случае режима двухполярных импульсов и наличия термоэлектрической эмиссии катода наблюдаться другая картина. Прикатодный энергетический барьер будет незначительным (1-3В), так как он необходим только для создания у поверхности катода концентрации плазмы, достаточной для компенсации объемного заряда электронов, эмитируемых катодом. При этом, чем больше рабочий ток, тем выше энергетический барьер. Поэтому каждый электрод в фазе катода будет охлаждаться током эмиссии, теряя энергию (в первом пренебрежении ионным током) равную $I \cdot (\chi_{\kappa} + 2kT_{\kappa})$, где χ_{κ} , T_{κ} – работа выхода материала и температура катода. Нагрев же электрода в фазе анода останется прежним: $I \cdot (\chi_a + 2kT_e)$. Учиты-

вая факт, что для двухполярного питания лампы температуры электродов будут в приблизительно одинаковы, и, следовательно, работы выхода у них будут близки, то термоэмиссионное охлаждение в фазе катода скомпенсирует потенциальное нагревание в фазе анода, оставив на нагревание только разницу температур электронов в плазме столба равную $I \cdot 2k(T_e - T_\kappa)$.

Таким образом, в случае двухполярного питания потери на нагрев анода компенсируется, а образовавшийся остаток энергии используется обеспечение эмиссии с электродов.

4.5.2.2. Экспериментальное исследование стабилизации параметров излучения двухполярным питанием лампы

Электрическое питание лампы посредством поочередного приложения к электродам импульсов напряжения различной полярности широко использовалось разработках ксеноновых ламп накачки лазеров [10] и в натриевых лампах высокого давления для уличного освещения [104]. Двухполярное питание позволяет полностью исключить катафорез и выровнять тепловой баланс электродов в случае их идентичного конструктивного исполнения. В результате тепловое поле разрядной трубки максимально симметрично, а это, в свою очередь, делает ее минимально чувствительной к поворотам в вертикальной плоскости.

Исследование применения двухполярного питания проводились на экспериментальной установке при подаче на лампу импульсно - периодической структуры импульсов, приведенной на рисунке 4.4.

Универсальный источник электрического питания газоразрядной лампы позволял исследовать осциллограммы тока в режимах однополярных и двухполярных импульсов. В экспериментах изучались два типа ламп:

 серийной конструкции, в которой катод представлял собой биспираль из торированного вольфрама, а точеный анод имел коническую часть, обращенную в сторону разряда; в экспериментальной разрядной горелке оба электрода были выполнены в виде биспирали.



Рисунок 4.4. Блок – схема установки для исследования на электрические характеристики влияния пространственного положения газоразрядной лампы.

1 – исследуемая лампа, 2 – катод, 3 – анод, 4 – универсальный источник электрического питания, 5 – токовый трансформатор, 6 – осциллограф, 7 – пирометр.

В качестве критериев нестабильности параметров принимались пиковые значения импульсов тока в серии при быстром повороте лампы на угол α (рисунок 4.4) от вертикального положения лампы с катодом внизу. Осциллограммы тока фиксировались осциллографом при подключении к токовому трансформатору LT1000. После поворота лампы на требуемый угол α перпендикулярно к ее оптической оси на расстоянии 1 м устанавливалась тепловизионная система SDS HotFind-LXT и производилось измерение температурного поля оболочки, в соответствии с методикой изложенной в разделе 2.1.4.



Рисунок 4.5. Осциллограммы импульсов тока (серийной лампы СП2-1500 (a) и разработанной лампы СП4-1500 (б) с разрядом в цезий – рубидий – ксеноновой смеси при повороте лампы с вертикального в горизонтальное положение.

Сравнение представленных на рисунке 4.5 осциллограмм токовых импульсов показывает, что амплитуда импульсов тока одинакова по величине в серии, при мгновенном повороте (не более 2 секунд) из вертикального положения (катодом вниз) в горизонтальное в случае цезий – рубидий – ксенонового разряда. Предложенное техническое решение может кардинально повысить эффективность всей ОЭС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ отечественной и зарубежной научно – технической литературы и определены основные параметры, определяющие характеристики излучения импульсных ламп с разрядом в парах щелочных металлов.

2. Разработана математическая модель трехкомпонентной слабонеидеальной плазмы щелочного металла, ртути и инертного газа, описывающая физические процессы разряда в ограничивающих его сапфировых оболочках, предложен алгоритм решения системы уравнений.

3. Рассчитано спектральное распределение излучения разряда, лампы и глубины модуляции, выявлены зависимости температуры внутренней поверхности разрядной трубки от средней электрической мощности разряда, пиковой силы излучения в спектральных диапазонах 1 и 2 от внутреннего радиуса разрядной трубки, КПД излучения в спектральном диапазоне 2 от удельной электрической мощности.

4. Показано расчетным путем:

- величина пиковой силы излучения в диапазоне 1 в 7-8 раз выше, чем в диапазоне 2;

- при температуре внутренней поверхности разрядной трубки 1200К увеличение R от 0,55 см до 1,5 см приводит к росту I_2 примерно в 2 раза, а при 1500К изменение R от 0,55 см до 0,75 см обеспечивает возрастание I_2 на 30%, повышение R от 0,55 см до 1,5 см дает рост в 2,3 раза;

глубина модуляции излучения остается близкой к 100% в области спектра до 3,1 – 3,2 мкм, после чего постепенно снижается и при длине волны около 5,8 мкм стремится к нулю;

5. Доказано в результате проведенного термодинамического анализа разряда в парах сплавов цезия со ртутью, калием и рубидием, что:

- замена цезия на рубидий в составе плазмообразующей среды приведет к снижению глубины модуляции ИК излучения, а замена ртути рубидием обеспечит повышение пиковой силы излучения в 1,3 раза;

 увеличение массы цезия в сплаве с рубидием приводит к увеличению его давления паров и, как следствие, к росту пиковой силы ИК излучения разряда в цезий – рубидий – ксеноновой смеси.

6. Исследованы спектрально - энергетические и электрические характеристики ламп с разрядом в смесях цезия со ртутью, калием и рубидием и доказана возможность прямой замены серийной лампы СП2-1500 на импульсный источник ИК излучения с цезий – рубидий – ксеноновой плазмообразующей средой.

7. Обеспечены стабильность разряда в цезий – рубидий – ксеноновой смеси при одновременном возрастании характеристик ИК излучения на основе выполненных расчетов и разработанных вариантов конструкции электродов газоразрядной лампы.

8. Выполнены конструкторские и технологические исследования, направленные на разработку герметичных токовводов в разрядную трубку и внешнюю колбу лампы, технологии откачки и наполнения горелки плазмообразующей средой, способа герметизации рабочего объема, обеспечили надежность газоразрядной лампы, что подтверждено положительными результатами механо - климатических испытаний и испытаний на безотказность работы в течение 175 часов.

9. Проанализированы факторы, определяющие стабильность параметров газоразрядной лампы (катафорез, диффузия атомов и заряженных частиц и т.д.), и выявлена определяющая роль влияния конвекции на характеристики плазмы при изменении пространственного положения лампы. Предложен способ двухполярного электрического питания, обеспечивающий постоянство токовых импульсов в серии импульсно - периодической структуры.

10. Разработана и освоена в опытном производстве газоразрядная лампа СП4-1500 (ТУ 6364-008-77534031-2016) на основе импульсно – периодического разряда в цезий – рубидий – ксеноновой смеси, обеспечивающая максимально достижимую на сегодняшний день эффективность ОЭС. По совокупности эксплуатационных параметров созданный ИК источник находится на уровне лучших известных зарубежных аналогов, работающих при удельной мощности не более 430 Вт/см.
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гавриш С.В., Кобзарь А.И. Импульсный газовый разряд как источник оптической помехи в инфракрасной области спектра. // Электронные информационные системы. – 2019. - №2.- С. 43 - 60.
- Щербак Н. Противодействие зенитным управляемым ракетам с инфракрасным наведением. Современные бортовые средства // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - 2000. - №5 - С. 52-55.
- Кашин В.М., Лифиц А.Л., Ефремов М.И. Основы проектирования переносных зенитных ракетных комплексов. М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.-227с.
- Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. Импульсные газоразрядные источники ИК излучения для оптико электронных систем //Успехи прикладной физики. -2018. Т. 6, №4.- С. 333 348.
- Гавриш С.В. Влияние условий теплосъема на параметры импульсного газоразрядного источника ИК-излучения // Прикладная физика. -2018.-№5.- С.86-93.
- Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей / С.В. Гавриш, Е.Н. Гайдуков, Б.А. Константинов и др. // Светотехника. - 1998. №3. -С. 22-24.
- Гавриш С.В. Процессы конденсации и испарения амальгамы цезия при включении и зажигании газоразрядных ламп // Прикладная физика. -2018. - №6.-С.84 - 89.
- Гаврилов С.А., Гавриш С.В., Петренко Н.Ю. Термодинамика испарения амальгамы цезия в газоразрядных приборах //Успехи прикладной физики. -2018. - Т. 6, №6.- С. 471 – 475.
- 9. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991. 720с.
- 10. Импульсные источники света / И.С. Маршак, А.С. Дойников, В.П. Жильцов и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978.– 472 с.
- 11. Ключарев А.Н., Янсон М.Л. Элементарные процессы в плазме щелочных металлов. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 221 с.

- Schmidt K. Radiation characteristics of high pressure alkali metal discharges.
 Proc. 6th Int. Conf. Ionization Phenomena Gases. Paris, 1963, v. 3, P. 323- 330.
- Bayha William T., Creedon John E., Schneider Sol. Alkali-vapor light sources as optical pumps for Nd:YAG lasers // IEEE-Trans. Electron Devices. – 1970. – V. 17, №8. - P. 612-616.
- 14. Либерман И. Источники некогерентного оптического излучения. //Справочник по лазерам, /Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978. С.58-78.
- 15. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы: Пер. с англ. М.: Энергия, 1977. 341с.
- Скобелев В.М., Афанасьева Е.И. Источники света и пускорегулирующая аппаратура. - М.: Энергия, 1973. - 368с.
- 17. Волкова Е.Б. Исследование и разработка натриевых ламп высого давления мощностью 250 Вт: Автореф. дис. канд. тех. М., 1983. 23 с.
- Григорян А.Н. Исследование и разработка натриевых ламп высокого давления с улучшенными спектральными характеристиками: Автореф. дис. канд. тех. наук. - М., 1990. – 22 с.
- Зависимость световых и электрических характеристик натриевого разряда высокого давления от состава и температуры амальгамы натрия / Е.Б. Волкова, Н.А. Родионова, Г.Н. Рохлин и др. // Светотехника. – 1976. - № 10. - С.10-12.
- 20. Волкова Е.Б., Кобина З.Н., Рохлин Г.Н. Исследование теплового баланса колбы натриевой лампы высокого давления // Светотехника.– 1974. №8.- С. 3 5.
- 21. Волкова Е.Б., Рохлин Г.Н. Инженерный расчет натриевых ламп высокого давления // Светотехника. 1979. №4.- С. 1 5.
- Waymouth John F., Wyner Elliot F. Analysis of factors affecting efficacy of a high-pressure sodium lamps. // J. Illum. Eng. Soc.- 1981, 10, №4, P. 237-242. Discuss, 242-244
- 23. Waszink J.H. Spectroscopic measurements on a high pressure Na Xe discharge and coparison with a nonequilibrium calculation // J. Appl. Phys. 1975. vol. 46, №7. p. 3140-3145.
- 24. Akutsu H. Radiation characteristics of the high pressure sodium lamp // I. Illum.
 Eng. Instr. 1974. v. 58. №12. p. 658 666.

- 25. The vapor pressures of sodium and mercury sodium amalgams at HPS lamp operating temperatures. / Hirayama C., Andrew K.F., Kleinosky R.L. // J. Illum. Eng. Soc. -1983. - vol. 12, №2. - p. 66 - 69.
- 26. Measured and calculated variation of efficacy with input power per unit length in high-pressure sodium lamps. // Denbigh P.L., Jones B.F., Mottram D.A.J ./ 3rd Int. Symp. Sci. and Technol. Light Sources, Toulouse. - 1983., Toulouse. -P. 66 - 67.
- 27. Гавриш С.В. Влияние плазмодинамики натриевого разряда на спектральные характеристики излучения. // Прикладная физика 2011. №3. С. 67-72
- 28. Н.П. Петренко Расчет, исследование и конструирование натриевых ламп высокого давления с улучшающими спектральные характеристики добавками: Автореф. дис. канд. тех. наук. - М., 1991. – 24 с.
- Спектр видимого излучения импульсно периодического разряда высокого давления в цезии/ Ф.Г. Бакшт, С.В. Гавриш, В.Б. Каплан и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34, вып. 24. С. 55-60.
- 30. Исследование оптических свойств импульсно периодического разряда высокого давления в цезии / Ф.Г. Бакшт, С.В. Гавриш, В.Б. Каплан и др. // Прикладная физика. – 2009. №6. - С. 83-87.
- 31. Основы конструирования разрядных источников с сапфировой оболочкой / С.В. Гавриш, М.А. Левкин, Д.В. Шерстнев и др. // Технология машиностроения.
 2011. №4. С. 59-65.
- 32. Гавриш С.В., Градов В.М., Терентьев Ю.И. Особенности конструкции и работы ламп с сапфировыми оболочками // Светотехника. 2008. №2.- С. 12-18.
- 33. Патент РФ (полезная модель) № 52655, МПК Н01Ј 1/34. Разрядный источник инфракрасного излучения. /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, И.Т. Цогоев, и др. // 10.04.2006, Бюл. №10.
- 34. Патент РФ (полезная модель) № 54698, МПК Н01Ј 1/34. Разрядный источник модулируемого инфракрасного излучения. /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, И.Т. Цогоев, и др. // 10.07.2006, Бюл. №19.

- 35. Gavrilov S. A., Gavrish S. V., Puchnina S. V. Investigation of processes in glassceramic solders of sapphire-niobium seals in gas-discharge lamps // Glass and ceramics - 2019.- Vol. 75, No. 9 – 10. - P. 408 – 412.
- 36. Puchnina S.V. Changes in the structure of materials in brazing niobium with sapphire using a glass–ceramic solder// Welding International. - 2016. - Vol. 30, No. 9. -P. 727–732.
- 37. Патент РФ (полезная модель) № 97213, МПК Н01Ј 65/00. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев и др.//27.08.2010, Бюл. №11.
- 38. Исследование физико химических процессов пайки конструктивных элементов газоразрядных ламп с сапфировой оболочкой. / С.В. Гавриш, Н.Ю. Петренко, С.В. Пучнина и др.//Сварочное производство.–2019. - №9- С. 25 – 30.
- Gavrish S.V., Loguinov V.V., Puchnina S.V. Technology for producing permanent joints between sapphire and metals// Welding International.- 2015.- Vol. 29, No. 1.-P. 78–80.
- 40. Пучнина С.В. Металлизационные покрытия на сапфире для пайки с металлом
 // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно технической конференции «INTERMATIC-2014»,
 Ч. 3 М.: Энергоатомиздат, 2014 С. 159 162.
- 41. Патент РФ (полезная модель) № 109918. МПК Н01Ј 61/34. Цезиевая лампа с двумя лейкосапфировыми оболочками /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Т.В. Игнатова и др. // 27.10.2011, Бюл. №30.
- 42. Patent 4467238 (USA), Int. H 01 J 61/34. High-pressure sodium lamp with improved IR reflector. / Silverstein Seth D., Prener Jerome S.; General Electric Co. // № 298836; Filed 03.08.81; Date of patent 21.08.84.
- 43. Гаврилов С.А., Гавриш С.В., Пучнина С.В. Термоупругие напряжения в соединениях сапфира с металлом. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно - технической конференции «INTERMATIC-2015», Ч. 3 - М.: Энергоатомиздат, 2015. - С. 110 -113.

- 44. Гавриш С.В., Петренко Н.Ю., Пучнина С.В. Особенности конструкции гермовводов в разрядные лампы с двумя сапфировыми оболочками.// Материалы 13й Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электроники и энергетики». - Саранск 2017. - С. 295-300.
- 45. Градов В.М., Гавриш С.В., Рудаков И.В. Моделирование электрофизических процессов в импульсно периодических трубчатых источниках мощного инфракрасного излучения с сапфировыми оболочками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение. -2017. - №6.- С. 130 - 145.
- 46. Градов В.М., Гавриш С.В., Рудаков И.В. Спектрально энергетические характеристики импульсно – периодических трубчатых источниках мощного инфракрасного излучения с сапфировыми оболочками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. Приборостроение. -2018. - №3.- С. 91 - 103.
- 47. Градов В.М., Щербаков А.А., Яковлев А.В Расчет оптических и электрофизических характеристик дуговых разрядов в парах щелочных металлов // ТВТ. – 1983. –Т.21, №5. - С.858 –864.
- 48. Математическое моделирование и исследование импульсных разрядных ламп инфракрасного излучения / Гавриш С.В., Градов В.М., Кузнецова А.В. и др. // Светотехника. -2008.- №5.- С. 14-18.
- 49. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982. – 375 с.
- 50. Градов В.М. Разработка методов расчета и исследование радиационных процессов в системах с разрядными источниками селективного излучения: Дис. докт. тех. наук. – М., 2002. - 326 с.
- 51. Исследование факторов, определяющих модуляционные характеристики разрядных ИК источников // С.В. Гавриш., А.И. Кобзарь, В.С. Жмаев и др. // Прикладная физика. – 2009. №1. – С. 53-59.
- 52. Дубасов Е.И., Каталова Т.А., Цибизов В.Д. Приборы для исследования электрических характеристик импульсного разряда//Состояние и перспективы разработки и производства газоразрядных источников оптического излучения для

накачки квантовых генераторов: Тез. докл. Всесоюз. конф. – М., 1977. - С.117-119.

- 53. Пчелин В.М., Розовский Е.И., Рохлин Г.Н. Особенности измерения температуры колб высокоинтенсивных источников света термопарным способом. // Светотехника. – 1980. - №11. - С.11-14.
- 54. Рохлин Г.Н., Семенов Н.Я. Экспериментальное определение температуры горелок натриевых ламп высокого давления. //Светотехника –1978. - №12. - С.4-7.
- 55. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение.- М.: Мир, 1988. 416 С.
- 56. Лингарт Ю.К., Петров В.А. Измерение температуры поверхности некоторых полупрозрачных материалов// ТВТ.- 1980. Т. 10, №1.- С. 174-180.
- 57. Bayha William T., Creedon John E., Schneider Sol. Alkali-vapor light sources as optical pumps for Nd:YAG lasers // IEEE-Trans. Electron Devices. 1970. V. 17, №8. P. 612-616.
- 58. Гаврилов С.А., Гавриш С.В., Пучнина С.В. Метод контроля потерь щелочных металлов в стеклокерамических соединениях сапфира с ниобием // Известия вузов. Электроника. – 2016. – Т. 21, вып. 1. – С. 13 – 20.
- 59. Антонов П.И., Затуловский Л.М., Костылёв А.С. Получение профилированных монокристаллов и изделий методом Степанова. - Л.: Наука, 1971.- 280 с.
- 60. Добровинская Е.Р., Литвинов Л.А., Пищик В.В. Энциклопедия сапфира Харьков: Институт монокристаллов, 2004. - 508 с.
- 61. Добровинская Е.Р., Кожушко Г.М., Литвинов Л.А. и др. Эффективность применения искусственного сапфира для горелок натриевых ламп высокого давления. // Светотехника. - 1979. - №4. - С. 8-9
- 62. Гавриш С.В. Технология выращивания и характеристики профилированных сапфировых труб для оболочек разрядных ламп. // Технология машиностроения. – 2008. №6. – С. 56-61.
- 63. Патент РФ (полезная модель) № 134699. Разрядная лампа с цезиевым наполнением МПК Н01Ј 61/00 /С.В. Гавриш, С.В. Пучнина, А.В. Сурдо и др.//20.11.2013, Бюл. №32.

- 64. Пучнина С.В. Структурные изменения в материалах при пайке стеклокерамическим припоем ниобия с сапфиром // Сварочное производство. 2015. №9. С. 21 27.
- 65. Тахчиев С., Самунева Б., Джамбазин П., Марчев В. Керамические припои для горелок натриевых ламп высокого давления // Стекло и керамика. 1990. №12.
 С. 25-26.
- 66. Breaking stresses in seals of sapphire lamps / E.N. Gaidukov, V.B. Brailovskii, S.V. Gavrish, A.E. Ryzhkov // Light & Engineering. 1998. V. 6, №1. P. 37-41.
- 67. Преснов В.А., Новодворский Ю.Б., Якубеня М.П. Основы техники спая. Томск: Изд-во Томск. Универ., 1961. - 224 с.
- 68. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. Технология получения неразъемных соединений сапфира с металлами. // Сварочное производство. - 2014.- №1.- С. 31- 34.
- 69. А.с. 1515959 СССР, МКИ³ Н 01 Ј 61/30. Газоразрядная лампа / В.Б. Браиловский, Р.В. Браиловская, Е.Н. Гайдуков и др. // Б.И. –1986.- № 37.
- 70. Пат. (полезная модель) 32321 (Россия), МПК⁷ Н01Ј 61/34. Разрядный источник модулируемого инфракрасного излучения /С.В. Гавриш, И.Т. Цогоев, А.И. Кобзарь, В.А. Самодергин // Открытия и изобретения.-2003. № 25.
- 71. Гайдуков Е.Н. Создание ламп накачки твердотельных неодимовых лазеров на основе дугового разряда в парах щелочных металлов: Автореф. дис. канд. тех. наук. - М., 1984. – 24 с.
- 72. Белоусова Л.Е. Расчёт температуры электрода ксеноновой лампы //Светотехника. – 1983. - №6. - С. 9.
- Патент РФ (полезная модель) № 123227. МПК Н01Ј 61/06. Разрядный источник модулированного инфракрасного излучения. /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. // 20.12.2012, Бюл. №35
- 74. Ниобий и его сплавы/ Г.В. Захарова, И.А. Попов, Л.П. Жорова, Б.В. Федин М.: Гос. Научн. техн. Изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1961. 380 с.

- 75. А. с. 1515959 СССР, МКИ³ Н 01 Ј 61/30. Газоразрядная лампа / В.Б. Браиловский, Р.В. Браиловская, Е.Н. Гайдуков и др. // Б.И. –1986.- № 37.
- 76. Патент РФ (полезная модель) №130750. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК Н01Ј 61/02/ С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина, А.В. Сурдо // 27.07.2013, Бюл. №21.
- 77. Термостойкие диэлектрики и их спаи с металлом в новой технике /М.А. Рубашев, Г.И. Бердов, В.Н. Гаврилов и др. – М.: Атомиздат, 1980. - 246 с.
- 78. Герасимова Л.Ф., Ермакова А.А., Постнова Н.И. Разработка высокотемпературных металлокерамических соединений на основе корундовых соединений // Электронная техника. Сер. Материалы. – 1968. - №7 - С. 93-97.
- 79. Батыгин В.Н., Метелкин И.И., Решетников А.М. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. М.: Энергия, 1973. 408с.
- 80. Гайдуков Е.Н., Геращенко П.И. Исследование и разработка ламп накачки маломощных твердотельных лазеров/Техн. отчет. – М.:1980, - Гос. рег. № У46787.
- 81. Гайдуков Е.Н. Разработка и исследование экспериментальных образцов сапфировых ламп накачки с долговечностью не менее 5000 часов /Техн. отчет. – М.:1980, - Гос. рег. № У80994.
- 82. А.с. 1056305 (СССР), МКИ³ Н 01 Ј 9/24 Способ изготовления газоразрядной лампы / В.Б. Браиловский, Е.Н. Гайдуков, А.Е. Рыжков и др. //Б.И.-1983.- № 43.
- 83. А. с. 1380514 СССР, МПК⁷ Н 01 Ј 9/00 (СССР). Способ изготовления разрядной лампы / Г.С. Леонов, В.В. Павлов, Л.Г. Сапрыкин и др. // Б.И. –1986. -№ 40.
- 84. Патент РФ (полезная модель) № 117038. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК Н01Ј 61/00 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Т.Н. Баринова, С.В. Пучнина, В.В. Логинов // 10.06.2012, Бюл. №16.
- 85. Колпакова И.В. Исследование дугового разряда в парах калия как источника накачки лазеров непрерывного действия на АИГ:Nd³⁺: Автореф. дис. канд. физ. мат. наук. Л., 1990. 21 с.
- Anderson N.C. Laser pumplamps.-ILC Technology. 1979, Techn. Report AFAC-TR-79-1002.

- 87. Весельницкий И.М., Рохлин Г.Н. Ртутные лампы высокого давления, М.: Энергия, 1971.
- 88. Патент РФ (полезная модель) № 32321. Разрядный источник модулированного инфракрасного излучения. 7 Н 01Ј 61/34 /С.В. Гавриш, И.Т. Цогоев, А.И. Кобзарь, В.А.Самодергин // 10.09.2003, Бюл. №25.
- 89. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы: Пер. с англ. М.: Энергия, 1977. 341с.
- 90. Вульф Б.К., Борщевский С.М. Титан в электронной технике. М: Энергия, 1975. 184 с.
- 91. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Ясенчук Ю.Ф. и др. Никелид титана. Материал нового поколения. Томск: Изд-во МИЦ, 2006. 296 с.
- 92. Эспе В. Технология электровакуумных приборов. М. -Л.: Госэнергоиздат, 1962. 632 С.
- 93. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Справочник. / Под ред.
 Н.П. Лякишева. М: Машиностроение, 1997. Т. 2. 1024 с.
- 94. Металлохимические свойства элементов периодической системы / И.И, корнилов, Н.М. Матвеева, Л.И. Пряхина и др. – М.: Наука, 1966. – 351 с.
- 95. Гладков А.С., Подвигина О.П., Чернов О.В. Пайка деталей электровакуумных приборов. М.: Энергия, 1967. 288 с.
- 96. Пайка светопрозрачного оксида алюминия с ниобием в натриевой лампе высокого давления / К. Симогаки, С. Ямасаки, Я. Ямомото и др.// Семэй гаккай си.
 1985.- Т.69, № 2. С.59-64.
- 97. Масленников С.В. Применение микрорентгеноспектрального анализа. М.: Металлургия, 1968. 110 с.
- 98. Сенкевич К.С., Шляпин С.Д. Исследование процесса диффузионной сварки сплавов на основе никелида титана // Сварочное производство. – 2011- №4. – С. 47 – 50.
- 99. Жмудь Е.С., Шмелев А.Е., Метелкин И.И. Исследование взаимодействия титана с высокоглиноземистой керамикой // Неорганические материалы.- 1973.-Т.9. - №10.- С. 1798-1801.

- 100. Метелкин И.И., Шмелев А.Е. О пайке керамики активными металлами// Физика и химия обработки материалов. -1972.- №4. – С. 123-127.
- 101. Патент РФ (полезная модель) № 109918. Цезиевая лампа с двумя лейкосапфировыми оболочками. МПК Н01Ј 61/34 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов, Т.В. Игнатова, З.Д. Никифорова //27.10.2011, Бюл. №30.
- 102. Кудинов В.В., Бобров Г.В.Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. - М.: Металлургия, 1992. - 432 с.
- 103. Исследование факторов, определяющих модуляционные характеристики разрядных ИК источников // С.В. Гавриш., А.И. Кобзарь, В.С. Жмаев и др. // Прикладная физика. – 2009. №1. – С. 53-59.
- 104. Рохлин Г.Н. Работа натриевых ламп высокого давления в пульсирующем режиме // Светотехника. 2001. №3.- С. 2-8.

Личный вклад автора

в получение научных результатов диссертации «Исследование и разработка импульсного газоразрядного источника ИК излучения с повышенными эксплуатационными параметрами для оптико – электронных систем»

Вклад автора в публикациях по теме диссертации является определяющим и заключается в: выборе направления исследования и постановке задач, разработке методик и проведении экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных, получении основных научных результатов, разработке основных теоретических положений, апробации результатов исследования, подготовке публикаций по выполненной работе [A1, A2, A13]. Все результаты и научные положения диссертации, выносимые на защиту, получены и сформулированы лично автором.

Личное участие автора в расчетно – теоретических работах, выполненных в соавторстве, заключается в равноправном участии в формировании содержательной модели и систем уравнений с комплексом граничных условий [A3], проведение численных экспериментов по разработанным программам [A5], анализе адекватности моделей, корректировке расчетных схем и интерпретации полученных результатов [A10].

В работах, посвященных экспериментальным исследованиям, личный вклад автора заключается в непосредственном выполнении, участии в постановке задач или руководстве исследованиями [A3 – A5, A10], разработке методик испытаний, технических решений и анализе результатов [A6, A7- A12]. В итоге автор внес решающий вклад в разработку вопросов, рассматриваемых в диссертационной работе.

В создании запатентованных решений вклад автора заключается:

• в разработке конструкторских решений [A14-A16, A18, A25 –A27, A30 – A32],

• исследовании и разработке способов реализации функционирования газоразрядных источников и систем на их основе [А17, А19, А20, А28, А33, А35-А38],

• анализе физических и химических процессов в предлагаемом техническом решении в процессе технологической реализации и функционирования газоразрядной лампы [A21-A24, A29, A34].

Основные статьи в периодических журналах перечня ВАК РФ или публикации, индексируемые CKOPUS:

Публикации без соавторов:

- **А1.** Логинов **В.В.** Характеристики излучения импульсно периодического разряда в парах щелочных металлов//Прикладная физика.–2019.-№4.– С. 24 28.
- А2. Логинов В.В. Ксеноновые короткодуговые газоразрядные лампы сверхвысокого давления с сапфировой оболочкой // Успехи прикладной физики. - 2019.
 - Т. 7, №1. -С. 70 - 75

Публикации, выполненные в соавторстве:

- А3. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. Импульсные газоразрядные источники ИК излучения для оптико электронных систем //Успехи прикладной физики. -2018. Т. 6, №4.- С. 333 348.
- А4. Исследования температурных полей в разрядных источниках ИК излучения с сапфировой оболочкой / С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. // Оборонный комплекс России– научно- техническому прогрессу.–2014.- №1.-С. 49–55.
- А5. Исследование факторов, определяющих модуляционные характеристики разрядных ИК источников // С.В. Гавриш., А.И. Кобзарь, В.С. Жмаев и др. // Прикладная физика. – 2009. №1. – С. 53-59.
- А6. Контроль теплофизических и излучательных характеристик импульсного разряда в парах щелочных металлов оптико спектральными методами. / С.В.

Гавриш, В.В. Логинов, Д.В. Шерстнев и др.// Контроль. Диагностика. – 2011. №12. – С. 39-44.

- А7. Зависимость надежности импульсных ИК источников от радиационного воздействия излучения плазмы / С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. //Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика Радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2012. – вып. 2. С. 95- 100.
- A8. Gavrish S.V., Loguinov V.V., Puchnina S.V. Technology for producing permanent joints between sapphire and metals// Welding International.- 2015.- Vol. 29, No. 1.- P. 78–80.
- А9. Исследование физико химических процессов пайки конструктивных элементов газоразрядных ламп с сапфировой оболочкой / Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. и др. // Сварочное производство. – 2019. - №9. – С. 25 -30.
- А10. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пугачев Д.Ю., Пучнина С.В. Вакуумноплотные спаи сапфира с металлами //Успехи прикладной физики. -2019. - Т. 7, №5.- С. 480 -501.
- А11. Гавриш С.В., Логинов В.В. Материалы оболочек разрядных ламп высокого давления. Сапфир // Технология машиностроения. 2009. № 4. С. 5-9.
- А12. Гавриш С.В., Логинов В.В. Материалы оболочек разрядных ламп высокого давления. Поликор // Технология машиностроения. 2009. № 2. С. 8-9.

Доклады на международных конференциях без соавторов:

А13. Логинов В.В. Спектрально-энергетические характеристики излучения импульсного разряда в парах калия, рубидия и цезия// Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно - технической конференции «INTERMATIC-2013» - М.: Энергоатомиздат, 2013.- С. 111-114.

Примечание: 11 докладов выполнено в соавторстве.

Патенты на полезную модель:

- А14. Патент РФ (полезная модель) №71030. Газоразрядная лампа. МПК Н01Ј 61/36 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов, С.А. Пентин // 20.02.2008, Бюл. №5
- А15. Патент РФ (полезная модель) № 72578. Модулируемый источник инфракрасного излучения. МПК Н01Ј 61/52 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов и др. // 20.04.2008, Бюл. №11.
- А16. Патент РФ (полезная модель) № 85753. Короткодуговая газоразрядная лампа для устройства оптико-электронного противодействия. МПК Н01Ј 61/02 / С.В. Гавриш, В.С. Жмаев, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов // 10.08.2009, Бюл. №22
- А17. Патент РФ (полезная модель) № 88121. Устройство индивидуальной защиты летательного аппарата от управляемых ракет с оптическими головками самонаведения. МПК F41H 13/00 /С.В. Гавриш, Б.И. Желтиков, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов, М.А. Малышкин // 27.10.2009, Бюл. №30
- А18. Патент РФ (полезная модель) № 88210. Короткодуговая ксеноновая лампа для устройства оптико-электронного противодействия. МПК Н01Ј 61/02 / С.В. Гавриш, В.С. Жмаев, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов // 27.10.2009, Бюл. №30
- А19. Патент РФ (полезная модель) № 92741. Разрядный источник инфракрасного излучения для устройства оптико-электронного противодействия инфракрасным головкам самонаведения управляемых ракет. МПК Н01Ј 61/52 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов и др.// 27.03.2010, Бюл. №9.
- А20. Патент РФ (полезная модель) № 95430. Цезиевая лампа для устройства оптико-электронного противодействия инфракрасным головкам самонаведения управляемых ракет. МПК Н01Ј 61/02 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов, О.В. Шумейко // 27.06.2010, Бюл. №18
- А21. Патент РФ (полезная модель) № 97211. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК Н01Ј 61/00 /С.В. Гавриш, В.С. Жмаев, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов, О.В. Латынин // 27.08.2010, Бюл. №24

- А22. Патент РФ (полезная модель) № 97213. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК Н01Ј 65/00 /С.В. Гавриш, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов и др. // 27.08.2010, Бюл. 27.
- А23. Патент РФ (полезная модель) № 115485. Устройство для измерения оптической прозрачности в инфракрасной области спектра трубчатой оболочки из лейкосапфира газоразрядных ламп с цезиевым наполнением. МПК G01N 21/59 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, А.В. Королева, С.В. Пучнина, В.В. Логинов // 27.04.2012, Бюл. №12
- А24. Патент РФ (полезная модель) № 100671. Токоввод цезиевой лампы с двумя лейкосапфировыми оболочками. МПК Н01Ј 61/02 /С.В. Гавриш, В.С. Жмаев, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов, О.В. Латынин // 20.12.2010, Бюл. №35
- А25. Патент РФ (полезная модель) № 103669. Импульсная разрядная лампа инфракрасного излучения. МПК Н01Ј 61/34 /С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. // 20.04.2011, Бюл. №11.
- А26. Патент РФ (полезная модель) № 109917. Цезиевая лампа с двумя лейкосапфировыми оболочками. МПК Н01Ј 61/34 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, Д.Н. Кугушев, В.В. Логинов, В.Ю. Кустов // 27.10.2011, Бюл. №30
- А27. Патент РФ (полезная модель) № 109918. Цезиевая лампа с двумя лейкосапфировыми оболочками. МПК Н01Ј 61/34 /С.В. Гавриш, В.В. Логинов, Т.В. Игнатова и др. //27.10.2011, Бюл. №30.
- А28. Патент РФ (полезная модель) № 111348. Газоразрядный источник инфракрасного излучения для устройства оптико-электронного противодействия. МПК Н01Ј 61/30 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов и др. // 10.12.2011, Бюл. №34.
- А29. Патент РФ (полезная модель) № 117038. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением. МПК Н01Ј 61/00 / С.В. Гавриш, С.В. Пучнина, В.В. Логинов и др. // 10.06.2012, Бюл. №16.

- А30. Патент РФ (полезная модель) № 118793. Цезиевая лампа с лейкосапфировыми оболочками. МПК Н01Ј 61/34 /С.В. Гавриш, Т.Н. Баринова, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов, С.В. Пучнина // 27.07.2012, Бюл. №21
- А31. Патент РФ (полезная модель) № 121649. Цезиевая лампа с двумя лейкосапфировыми оболочками. МПК Н01Ј 61/00 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов, С.В. Пучнина, И.А. Питькова // 27.10.2012, Бюл. №30
- АЗ2. Патент РФ (полезная модель) № 123227. Разрядный источник модулированного инфракрасного. МПК Н01Ј 61/06 /С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. // 20.12.2012, Бюл. №35.
- АЗЗ. Патент РФ (полезная модель) №153815. МПК Н01Ј 61/52. Разрядный источник инфракрасного излучения для устройства оптоэлектронного противодействия инфракрасным головкам самонаведения управляемых ракет. / С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. // 10.08.2015, Бюл. №22.
- АЗ4. Патент РФ (полезная модель) № 130750. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением /МПК Н01Ј 61/02 /С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина, и др. // 27.07.2013. - Бюл. №21.
- А35. Патент РФ (полезная модель) №159078. Источник инфракрасного излучения для устройства оптико-электронного противодействия. МПК Н01Ј 61/00/ С.В. Гавриш, В.В. Логинов, А.В. Сурдо, и др. // 27.01.2016, Бюл. №3.
- АЗ6. Патент РФ (полезная модель) №142072. МПК Н01Ј 61/00. Источник модулируемого инфракрасного излучения для устройства оптоэлектронного противодействия инфракрасным головкам самонаведения управляемых ракет. / С.В. Гавриш, В.В. Логинов, А.В. Сурдо, и др. // 10.06.2014, Бюл. №17.
- АЗ7. Патент РФ (полезная модель) №171875. Источник инфракрасного излучения для устройства оптоэлектронного противодействия. МПК Н01Ј 61/56/ С.В. Гавриш, В.В. Логинов, А.В. Сурдо, и др. // 20.06.2017, Бюл. №17.
- АЗ8. Патент РФ (полезная модель) №168876. МПК F41H 13/00. Средство индивидуальной защиты летательного аппарата от управляемых ракет с инфракрасной головкой самонаведения. / С.В. Гавриш, Н.Ю. Петренко, В.В.Логинов и др. // 08.10.2018, Бюл. №28.

Приложение 2



Филиал АО «Стелла-К» (Зеленоград) тел. +7 (495) 792-73-57 zelenograd@stellak.ru 124460, г. Москва, г. Зеленоград, Панфиловский пр-т, дом 10

«УТВЕРЖДАЮ»



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Логинова Владимира Владимировича на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Настоящий акт составлен в том, что в филиале АО «Стелла – К» внедрены научно – технические результаты и рекомендации диссертационной работы «Исследование и разработка импульсного газоразрядного источника ИК излучения с повышенными эксплуатационными параметрами для оптико - электронных систем», заключающиеся в следующем:

1. В результате проведенных в ОКР «Забор» исследований физических, электрических, оптических и нагрузочных характеристик источников инфракрасного излучения с импульсно - периодическим разрядом в парах смесей щелочных металлов высокого давления, ограниченного системой сапфировых оболочек, разработана и освоена в опытном производстве модернизированная лампа СП4-1500, предназначенная для бортовых комплексов защиты летательных аппаратов от управляемых ракет с тепловыми головками самонаведения третьего поколения.

2. Результаты математического моделирования, экспериментальные данные и конструктивно – технологические исследования, отраженные в диссертации Логинова В.В., позволили головному предприятию в рамках ОКР «Моноблок» приступить к созданию принципиально нового комплекса обороны Л-418 и его экспортного варианта, в состав которых входит модернизированный инфракрасный источник ИК излучения СПЗ-1500.

Во всех перечисленных опытно – конструкторских разработках использованы рекомендации диссертационной работы Логинова В.В.

Главный инженер

Помощник директора по патентноправовым вопросам

Начальник лаборатории специальных источников излучения и аппаратуры

Балашов В.Ю.

Гусев В.В.

Пучнина С.В.





об использовании результатов диссертационной работы

Логинова Владимира Владимировича на тему «Исследование и разработка источника ИК излучения с импульсно — периодическим разрядом в парах смеси щелочных металлов для оптико – электронных систем» в опытно – конструкторских работах АО «СКБ «ЗЕНИТ».

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Логинова В.В. использованы в следующих опытно – конструкторских работах АО «СКБ «ЗЕНИТ»:

<u>ОКР «Забор».</u> С целью повышения пиковой силы излучения серийно выпускаемой газоразрядной лампы СП2-1500 проведены расчетные и экспериментальные исследования, в результате которых изменена конструкция электродных узлов, состав наполнения разрядной горелки и внешней колбы. По итогам проведенных исследований выпущена техническая документация и освоена в серийном производстве новая газоразрядная лампа СП4-1500.

<u>ОКР «Съемщик».</u> В данной работе использованы разработанные в диссертации методики исследования температурных полей газоразрядной лампы для оценки теплового состояния изделия в целом. Проведена корректировка режимов электрического питания изделия, на основе полученных в диссертации данных о влиянии параметров разрядного контура на выходные характеристики инфракрасного излучения лампы в составе оптико – электронной системы.

Начальник отдела

Иванов А.В.



УТВЕРЖДАЮ





о внедрении результатов диссертационной работы

Логинова Владимира Владимировича

«Исследование и разработка источника ИК излучения

с импульсно — периодическим разрядом в парах смеси щелочных металлов

для оптико - электронных систем»

в опытно – конструкторских работах АО «НИИ «Экран»

Комиссия в составе: председателя Н.Н. Лопатина – начальника отдела; членов комиссии – сотрудников АО «НИИ «Экран»: В.К. Тезейкина - начальника отдела, Т.А. Ершовой – заместителя начальника отдела, Р.А. Царева – начальника бюро составила настоящий акт о том, что следующие результаты диссертационной работы Логинова В.В.:

- опытные образцы цезий калиевых и цезий рубидиевых импульсных ламп с двумя сапфировыми оболочками типа СП2-1500;
- рекомендации по эксплуатации цезий калиевых и цезий рубидиевых импульсных ламп ИК излучения, обеспечивающие требуемые модуляционные и энергетические характеристики системы при заданной рабочей мощности;

способ включения цезий - калиевых и цезий - рубидиевых импульсных ламп типа СП2-1500, обеспечивающий необходимое время готовности и срок службы изделия

использованы при разработке токовых вводов газоразрядных ламп с двумя сапфировыми оболочками и оптического тракта систем, предназначенных для генерации мощных импульсных потоков инфракрасного излучения с модуляционными параметрами, соответствующими техническому заданию.

Разработка газоразрядных ламп проводилась в обеспечение ОКР «Витебск» и при разработке модификаций бортовых комплексов обороны «Президент - С» для различных летательных аппаратов.

Председатель комиссии:

Масся Н.Н. Лопатин Масся В.К. Тезейкин Мерр Т.А. Ершова Масся Р.А. Царев

Члены комиссии: