

На правах рукописи



**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»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в филиале АО "Стелла - К"

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

**Официальные  
оппоненты:** **Товстоног Валерий Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
"Космические аппараты и ракеты-носители"  
МГТУ им. Н.Э. Баумана.

**Власов Александр Николаевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
общей и экспериментальной физики  
Рязанского государственного радиотехнического  
университета

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

Защита состоится **«26» марта 2020 г. в 14:00** на заседании  
диссертационного совета Д.409.001.01 на базе АО «НПП «Исток» им. Шокина»  
по адресу 141190, Московская область, г. Фрязино, ул. Вокзальная, д. 2а.  
Большой конференц - зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «НПП «Исток»  
им. Шокина» и на сайте [www.istokmw.ru](http://www.istokmw.ru)

Автореферат разослан «03» февраля 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.409.001.01  
кандидат технических наук, доцент



Куликова И.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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).

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). В настоящее время в России создано новое поколение импульсных газоразрядных источников ИК излучения, удовлетворяющее перечисленным эксплуатационным характеристикам оптико-электронных систем для защиты ЛА. 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 оболочки, 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. 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:  $m = [I - I_n]/I \cdot 100\%$ . В настоящее время описанные отечественные образцы импульсных источников ИК излучения позволяют достичь пиковой силы излучения 70 Вт/см при удельной электрической мощности  $P_{уд.} = 800$  Вт/см, в то время как у серийной лампы СП2-1500 в процессе эксплуатации в составе ОЭС при  $P_{уд.} = 430$  Вт/см пиковая сила излучения не превышает 40 Вт/см. 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. 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  $P_{уд.}=430$  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 в приближении локального термодинамического равновесия математическая модель трехкомпонентной слабонеидельной цезий – ртуть – ксеноновой плазмы с уровнем температур  $(3-10) \cdot 10^3$  К 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 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 припоями, 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 ЛЗ70-5. Предложенные 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 В2-38), осциллографических (осциллографы С9-8, DS1052 Е), 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 - 2Н, 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

САМЕСА, рентгенофлуоресцентный анализатор FISCHERSCOPE 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 импульсно-периодическим разрядом, в отличие от серийных газоразрядных ламп с цезий-ртуть-ксеноновым разрядом, в спектральном диапазоне 3-5 мкм достигнута пиковая сила излучения не менее 50 Вт/см 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 экс-

периментов 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 конференции «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 «ЗЕНИТ», АО «Стелла – К», АО «НИИ «Экран», АО «НПО «БКО», ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

#### **Содержание диссертационного исследования.**

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

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

**В первой главе** на основе анализа отечественной и зарубежной научной литературы рассмотрены особенности механизма излучения разряда в парах щелочных металлов. Показано, что с увеличением атомного номера щелочного металла излучение резонансной линии смещается в инфракрасную длинноволновую область. При этом, как следует из работ К. Шмидта, увеличение давления паров щелочных металлов приводит с самообращению резонансных линий, и асимметричное уширение способствует перераспределению энергии излучения в средний ИК диапазон с длинами волн более 1,6 мкм. По данным Дж. Гридена при переходе к импульсному режиму работы лампы с разрядом в смеси нескольких щелочных металлов в спектре будет преобладать излучение наиболее тяжелого компонента, имеющего наименьший потенциал ионизации, т.е. цезия.

В выполнен научный анализ способов управления параметрами излучения ламп с разрядом в парах щелочных металлов. Наиболее изученным на сегодняшний день является разряд в натриевых лампах высокого давления (НЛВД). Из работ зарубежных (Д. Уорби, де Грутта, Д. Влиетта т.д.) и отечественных (Рохлина Г.Н., Волковой Е.Б. и т.д.) исследователей следует, что наиболее сильно на спектральные и энергетические параметры ламп влияют следующие конструктивные параметры: состав и давление компонентов над амальгамой, температура самой холодной точки лампы, диаметр и длина разрядного канала и т.д. (рисунок 1).



Рисунок 1. Основные факторы, определяющие характеристики излучения газоразрядной лампы с разрядом в парах щелочных металлов.

Для проверки возможности повышения пиковой силы излучения и глубины модуляции у серийной импульсной лампы с разрядом в цезий – ртуть – ксеноновой смеси при варьировании параметров, приведенных на рисунке 1, была разработана математическая модель газоразрядной лампы в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР). Происходящие в лампе процессы могут быть охарактеризованы как плазма высокого давления с уровнем температур порядка  $(3 - 10) \cdot 10^3 \text{K}$  и давлениями  $(0,1 - 0,4) \text{МПа}$ . Длительность прохождения тока в импульсных режимах составляет  $(200-300)$  микросекунд с частотой до  $1500 \text{Гц}$ .

В модели 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:

В приведенной системе уравнений применены следующие обозначения:  $n_e$  - 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) - (10) решается при заданных значениях давления  $p$ , рабочей температуры  $T$  и соотношениях цезия  $a_1$  и ртути  $a_2$ . В результате расчетов определяются концентрации частиц всех компо-

$$\frac{n_e n_i^{1+}}{n_i^0} = K_i^{1+}, i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\frac{n_e n_i^{2+}}{n_i^{1+}} = K_i^{2+}, i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$n_e + \sum_{i=1}^3 (n_i^0 + n_i^{1+} + n_i^{2+}) = \frac{p}{kT}, \quad (3)$$

$$\frac{n_1^0 + n_1^{1+} + n_1^{2+}}{n_2^0 + n_2^{1+} + n_2^{2+}} = a_1, \quad (4)$$

$$\frac{n_1^0 + n_1^{1+} + n_1^{2+}}{n_3^0 + n_3^{1+} + n_3^{2+}} = a_2, \quad (5)$$

$$n_e = \sum_{i=1}^3 (n_i^{1+} + 2n_i^{2+}), \quad (6)$$



нентов, что обеспечивает базу для расчетов материальных функций плазмы: коэффициентов электропроводности  $\sigma$ , теплопроводности  $\lambda$  и коэффициента поглощения  $k_v$ , а также теплоемкость  $C_p$  и проводимость  $\rho$  в зависимости от температуры, давления плазмы и соотношения компонент  $a_1$  и  $a_2$ . В ходе расчетов варьировались давление в разряде, диаметр разрядного канала, удельная и средняя электрические мощности, вводимые в разряд.

В результате расчетных исследований выявлено:

1. Величина пиковой силы излучения в диапазоне 1 в 7-8 раз выше, чем в диапазоне 2 (рисунок 2).

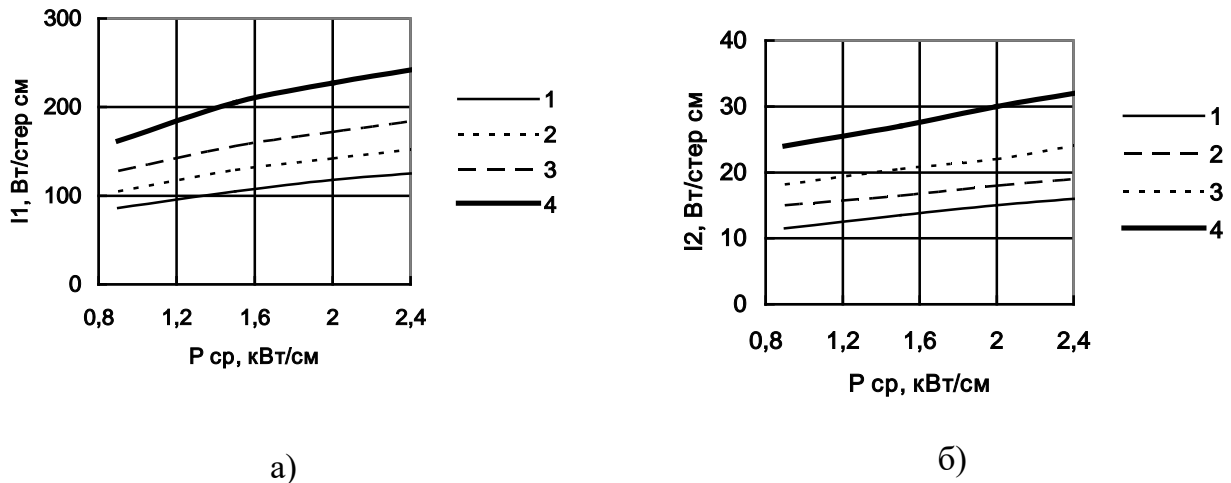


Рисунок 2. Зависимость пиковой силы излучения в спектральных диапазонах 1 (а) и 2 (б) от средней удельной электрической мощности. Параметры плазмы: 5–1–1,5; 1 –  $R = 0,55$ ; 2 – 0,75; 3 – 1; 4 – 1,5 см.

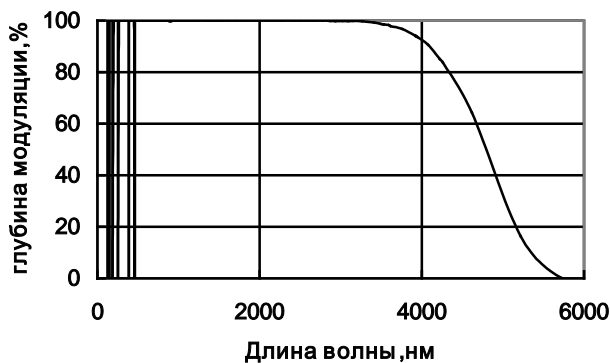


Рисунок 3. Спектральное распределение глубины модуляции излучения лампы. Параметры плазмы: 5–1–1,5;  $R = 0,75$  см, ток  $I = 500A$ ,  $P_{ср} = 940$  Вт/см.

$$K_i^{1+} = 2 \frac{Q_i^{1+}}{Q_i^0} \left( \frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_i^0 - \Delta E_i^0)/kT}, \quad (7)$$

$$K_i^{2+} = 2 \frac{Q_i^{2+}}{Q_i^{1+}} \left( \frac{2\pi mkT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_i^{1+} - \Delta E_i^{1+})/kT}, \quad (8)$$

$$\Delta E_i^{0,1+} = z \frac{e_0^2}{\rho_D}, i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

$$\rho_D = \frac{1}{e_0} \sqrt{\frac{kT}{\left( n_e + \sum_i n_i^{1+} + 4n_i^{2+} \right) 4\pi}}, \quad (10)$$

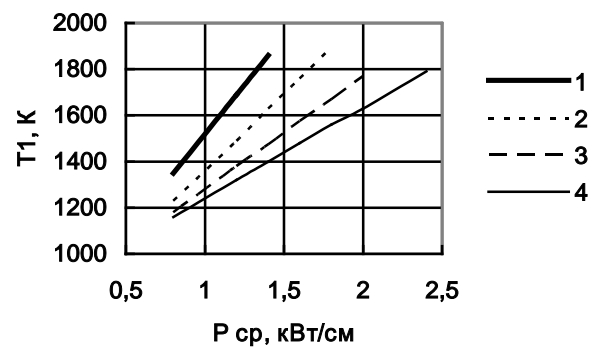


Рисунок 4. Зависимость температуры внутренней поверхности разрядной трубки от удельной электрической мощности. Параметры плазмы: 5–1–1,5; 1 –  $R = 0,55$ ; 2 – 0,75; 3 – 1; 4 – 1,5 см.

2. С увеличением внутреннего радиуса разрядной трубки происходит увеличение пиковой силы излучения при  $P_{cp}$  (рисунок 2).

3. Глубина модуляции излучения остается близкой к 100% в области спектра до 3,1 – 3,2 мкм, а затем постепенно снижается и при длине волны около 5,8 мкм стремится к нулю (рисунок 3). Данное обстоятельство связано увеличением постоянной составляющей излучения разогретых сапфировых оболочек газоразрядной лампы, обусловленной ростом температуры разрядной трубки при повышении  $P_{cp}$  (рисунок 4).

Таким образом, для роста пиковой силы излучения в спектральном диапазоне 2 необходимо повышать среднюю удельную электрическую мощность на оболочку разрядной трубки при увеличении диаметра разрядной трубки. Такое техническое решение неизбежно приведет к увеличению энергопотребления и увеличению габаритных размеров ОЭС, что противоречит поставленным в диссертации задачам.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию импульсно – периодического разряда в смеси паров различных щелочных металлов.

На первом этапе для проведения исследований был разработан и изготовлен универсальный источник электрического питания газоразрядной лампы (рисунок 5,а), обеспечивающий работу лампы при мощности до 2,5 кВт и частоте следования токовых импульсов 400÷500 Гц.

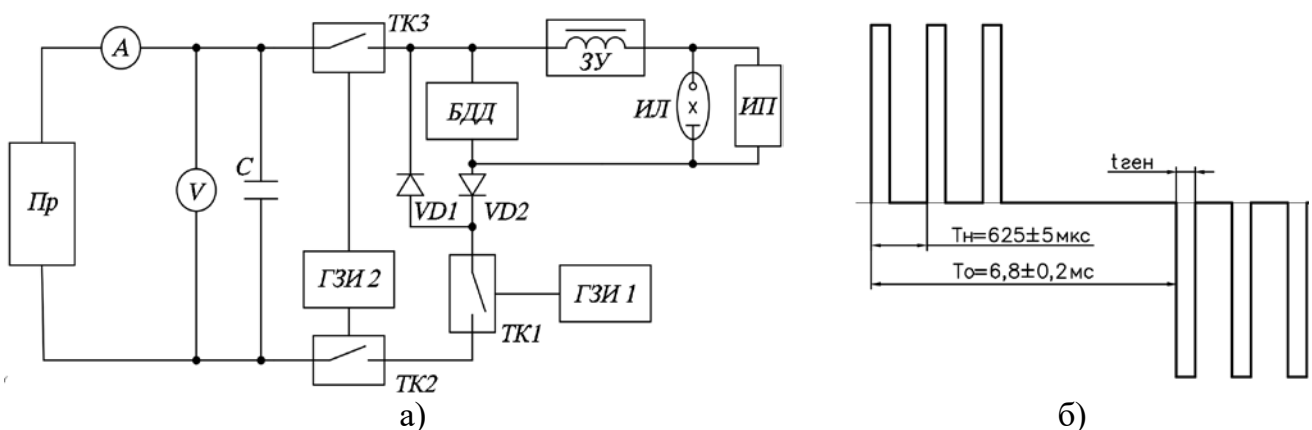


Рисунок 5. Функциональная блок - схема включения газоразрядных ламп с транзисторным модулятором (а) и импульсно – периодическая структура импульсов двухполярного (б) напряжения.

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

Отличительной особенностью разработанной схемы является наличие трех транзисторных ключей ТК1 – ТК3. Коммутатор ТК1 обеспечивает приведенную на рисунке 5,б структуру однополярных или двухполярных импульсов, которая формируется генератором задающих импульсов ГЗИ1.

В работе разработана оригинальная методика измерения температурных полей составных частей газоразрядной лампы, построенная на регистрации интенсивности ИК излучения в дальнем спектральном диапазоне от 7 мкм, подробно рассмотрены особенности регистрации характеристик ИК излучения, обработки полученных

результатов, метрологической аттестации средств измерения и сделаны оценки погрешности полученных данных.

На втором этапе исследований выполнен термодинамический анализ разряда в парах сплавов цезия с ртутью, рубидием и калием. С использованием математической модели, разработанной Петренко Н.Ю. и др. в работе [Известия ВУЗов. Электроника. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 124 – 132.], проведена оценка давления и теплопроводности паров металлов и ртути над их сплавами (рисунки 6, 7).

В работе приведен анализ представленных на рисунках 6 и 7 зависимостей, доказано, что наблюдаемые минимумы и изгибы кривых связаны с переходом разряда в насыщенных парах в ненасыщенное состояние.

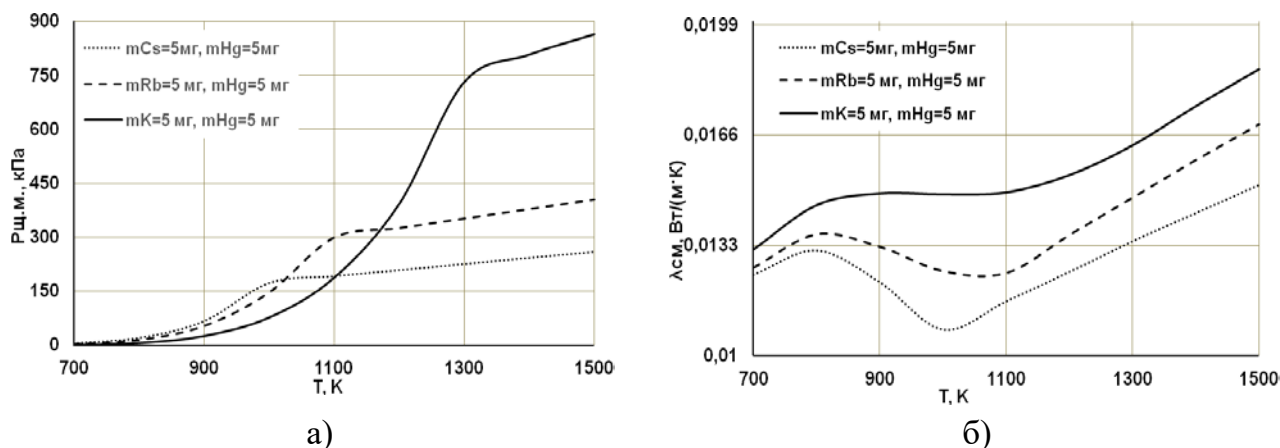


Рисунок 6. Зависимость давления насыщенных паров цезия, рубидия и калия (а) над амальгамой и теплопроводности смеси (б) от температуры холодной точки газоразрядной лампы.

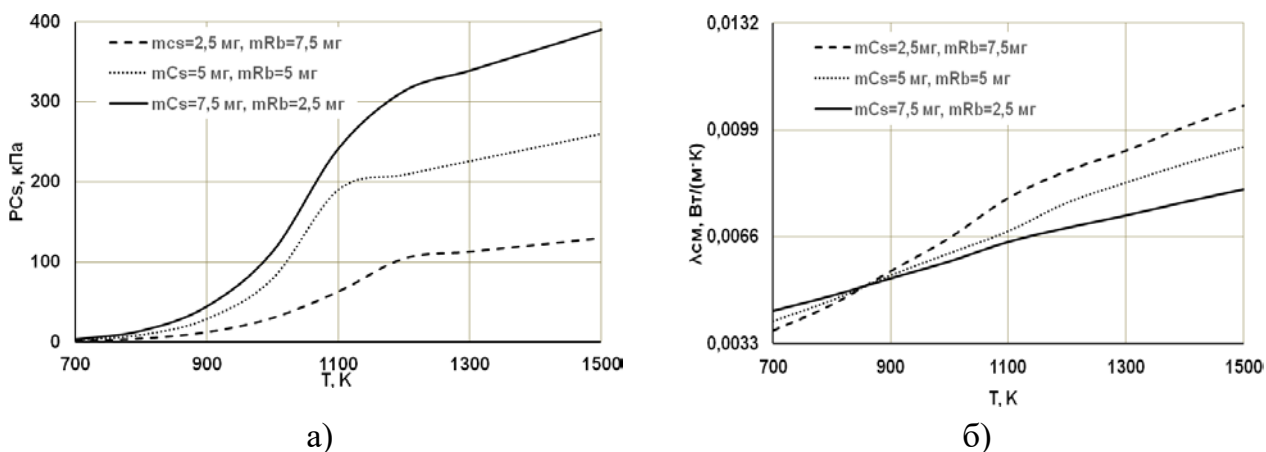


Рисунок 7. Зависимость давления (а) и теплопроводности (б) насыщенных паров цезия над его сплавом с рубидием в зависимости от состава и температуры холодной точки газоразрядной лампы.

В результате анализа полученных результатов термодинамического анализа сделаны следующие заключения:

1. Чем выше содержание цезия в исходной амальгаме (сплаве), тем ниже теплопроводность смеси и тем протяженней температурный интервал полного испарения цезия из амальгамы (сплава). Поэтому выбор состава наполнения серийных ламп СП2-1500, основанный на использовании цезий – ртуть – ксеноновой смеси, оправдан и правомочен, а прямая замена цезия на калий или рубидий отрицательно (рисунок 6) скажется на глубине модуляции газоразрядной лампы.

2. Из рисунка 7 видно, что уменьшение концентрации рубидия в сплаве приводит к возрастанию давления паров цезия. Этот факт свидетельствует о повышенной концентрации атомов цезия в разряде, что приводит к увеличению пиковой силы излучения газоразрядной лампы.

Таким образом, полученные результаты термодинамического анализа подтвердили правомочность замены ртути на рубидий в составе плазмообразующей среды серийной лампы СП2-1500 (ТУ 6343–005–07616187–02). При этом для обеспечения параметров излучения, превышающих требования на лампу СП2-1500, в состав наполнения газоразрядной лампы вводится рубидий массой, не превышающей 25% от общей дозировки металлов.

Третьим этапом исследований являлось изучение спектрально – энергетических характеристик ламп с идентичными конструктивными параметрами: диаметром 7 мм и длиной плазменного канала 90 мм, при удельной электрической мощности 430 Вт/см в импульсно - периодическом режиме. Давление паров в разряде исследуемых смесей (Cs–Hg–Xe, Cs–Rb–Xe, Cs–K–Xe) поддерживалось одинаковым за счет регулирования напряжения на лампе. Контроль давления осуществлялся по величине напряжения дежурной дуги. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики излучения экспериментальных ламп

Тип лампы	m, % в диапазоне 2	Пиковая сила излучения, Вт/ср		Средняя сила излучения, Вт/ср в различных спектральных диапазонах, мкм		
		диапазон 1	диапазон 2	0,7 – 2,7	0,4 – 0,7	0,4 – 10,6
<b>Cs–K–Xe</b>	94,4	53,5	22,0	32,8	6,0	56,9
<b>Cs–Rb–Xe</b>	92,6	90,3	35,6	28,4	8,3	61,3
<b>Cs–Hg–Xe</b>	90,3	53,5	21,7	28,4	7,9	48,1

Из представленных в таблице данных следует, что излучение разряда в цезий – рубидиевой смеси имеет преимущество в сравнении с остальными плазмообразующими средами. При этом, пиковая сила излучения в спектральном диапазоне 2 превышает  $I_1$  серийной цезий – ртуть – ксеноновой лампы в 1,6 раза.

Для проверки данного результата в работе был выполнен сравнительный анализ спектральных характеристик обоих разрядов по разработанной в диссертации оригинальной методике. Наложение спектров друг на друга дает четкое представление об энергетическом преимуществе излучения исследуемого разряда в требуемом спектральном диапазоне. На рисунке 8 приведены спектральные характеристики Cs–Hg–Xe и Cs–Rb–Xe разрядов, которые подтверждают полученные результаты калориметрических измерений (таблица 1).

На заключительном этапе во второй главе проведены исследования электрических характеристик и температурных полей серийного источника ИК излучения СП2-1500 и газоразрядной лампы с разрядом в Cs–Rb–Xe смеси. Выявлено:

1. Пиковые значения токов третьего импульса импульсно – периодической структуры обоих ламп примерно одинаковы 170 - 180А, что свидетельствует о воспроизводимости импульсно – периодической структуры инфракрасного излучения рассматриваемых разрядов.

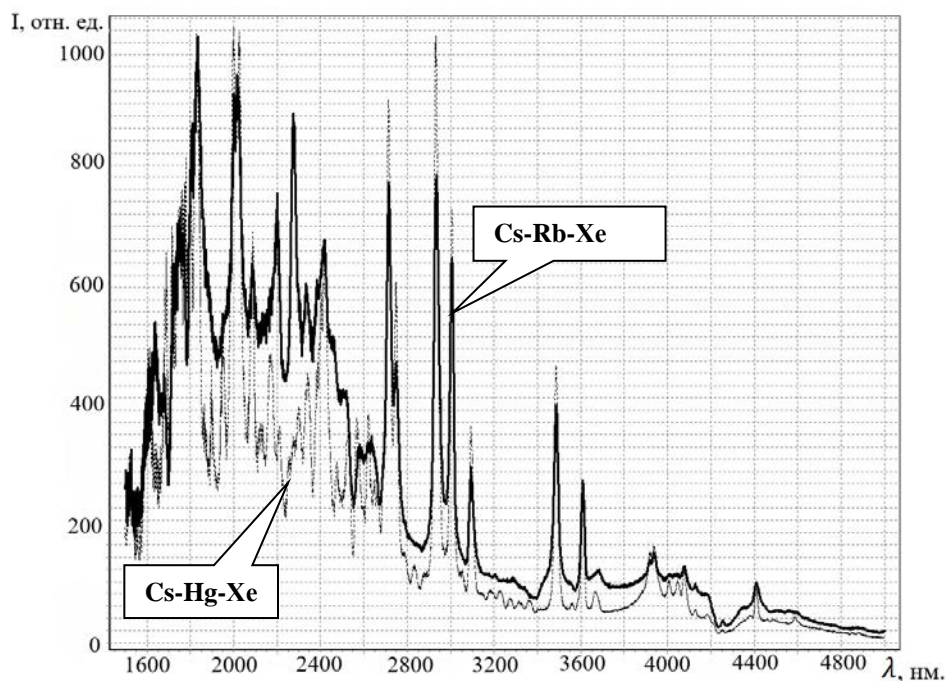


Рисунок 8. Спектральное распределение излучения Cs–Rb–Xe (толстая линия) и Cs–Hg–Xe разрядов (пунктирная линия).

2. Сопротивление плазменного канала (2 – 3 Ом) стабилизируется в случае обоих разрядов на 100 – й микросекунде с момента подачи импульса питающего напряжения, что позволяет использовать источник электрического питания серийной лампы СП2-1500, входящий в состав ОЭС.

3. Температуры сапфировых оболочек в случае обоих разрядов одинаковы и равны 780 - 790°C, что подтверждает сделанные выводы о сопоставимости теплопроводностей рассматриваемых плазмообразующих сред.

Таким образом, представленные результаты позволили сделать заключение, что при конструировании Cs–Rb–Xe лампы режимы электрического питания и условия охлаждения могут быть идентичны эксплуатационным параметрам серийной лампы СП2-1500 с разрядом в Cs–Hg–Xe смеси.

**В главе 3** рассмотрены основные конструктивные решения и исследованы физико – химические процессы, имеющие место при изготовлении ламп и в процессе их эксплуатации и, следовательно, определяющие надежность газоразрядных источников с сапфировой оболочкой. Для организации промышленного выпуска цезий – рубидий – ксеноновой газоразрядной лампы, обеспечивающей высокую долговечность в главе решены следующие задачи:

1. Разработана конструкция электродов, обеспечивающая длительную и устойчивую работу в импульсно – периодическом режиме следования токовых импульсов в парах щелочных металлов.

Выполнен расчет конструкции анода, исходя из равенства плотностей тепловых потоков, поступаемых на рабочую поверхность из плазмы, и формируемых в теле электрода за счёт джоулевого нагрева. Для снижения тепловых нагрузок на анод и, как следствие, уменьшения интенсивности непрерывного излучения нагретого электрода нами разработана конструкция рабочей поверхности анода, контактирующей с плазмой (рисунок 9). В предлагаемом техническом решении примыкание формообразующих 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 ( $\alpha$ ) связаны соотношением:

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

В случае катода, определяющим его надежность в условиях высоких токовых нагрузок, является электрическое сопротивление  $R$  штангеля, выполняющего функцию держателя керна катода. По этой причине в конструкции электродного узла цезий – рубидиевой лампы функции откачного штангеля и держателя электрода были разделены за счет применения двух разных деталей.

2. Разработано герметичное соединение электродных узлов с сапфировой оболочкой, обеспечивающее высокую механическую прочность, позволяющее исключить утечку щелочного металла по спаю и проникновение в разряд неона, заполняющего внешнюю колбу лампы. В основу конструкции и технологии получения гермоввода в цезий – рубидий – ксеноновую лампу положен принцип спаивания сплава ниобия НБЦу с сапфиром посредством стеклокерамического припоя системы  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ .

В главе подробно рассмотрено конструктивное исполнение колпачкового токоввода в разрядную трубку, проанализированы происходящие при пайке рекристаллизационные процессы в сплаве ниобия, из которого изготовлен электродный узел.

3. Разработана технология откачки и наполнения ламп с высокой точностью дозировки щелочных металлов в разрядном объеме и фиксации расположения холодной точки горелки. В основу наполнения положена технология восстановления бихроматов цезия и рубидия в присутствии титанового катализатора при температуре более  $600^\circ\text{C}$ , приведена расчетная методика удельной дозировки рубидия в цезий – рубидиевом разряде и определено оптимальное весовое соотношение:  $0,05 \leq m(\text{Rb}) \leq 0,24 \text{ мг/см}^3$ .

4. На заключительном этапе разработана технология герметизации разрядного объема лампы путем запайки откачного отверстия в катодном узле расплавом никелида титана. Изучена на микроанализаторе САМЕСА структура образовавшегося соединения при взаимодействии никелида титана со сплавом ниобия посредством анализа распределения интенсивности рентгеновской  $L$  линии ниобия и  $K$  линий титана и никеля по поперечному сечению заплавленного образца откачного штангеля. В результате выявлены зоны с колебаниями интенсивности линий титана и никеля, что объясняется наличием неравномерного структурного состава переходной зоны с включением второй фазы  $\text{Ti}_2\text{Ni}$ . На остальной площади переходной зоны (на границе ниобия с никелидом титана) количественный анализ состава образовавшегося основного расплава показал одинаковый результат: Ni - 39%, Ti - 25%, Nb - 36%.

5. Разработано герметичное соединение токовводов с внешней сапфировой колбой (рисунок 10), обеспечивающее высокую механическую прочность и позволяющее исключить утечку неона по спаю и проникновение воздуха в пространство между оболочками. В основу получения спая нами разработан комбинированный способ со-

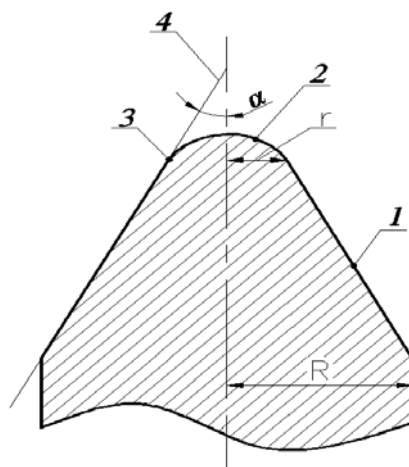


Рисунок 9. Конструкция анода газоразрядной лампы.

1, 2 – коническая и сферическая поверхности рабочей части анода; 3 – точка линии примыкания поверхностей рабочей части анода; 4 – образующая конической части анода.

единения сапфира с коваром. В разделе проанализирован механизм взаимодействия титана с сапфиром и расплавом медного припоя, определены режимы пайки.

В результате проведенных в третьей главе исследований разработана конструкция базового варианта газоразрядной лампы СП4-1500 с разрядом в цезий – рубидий – ксеноновой смеси, приведенная на рисунке 10.

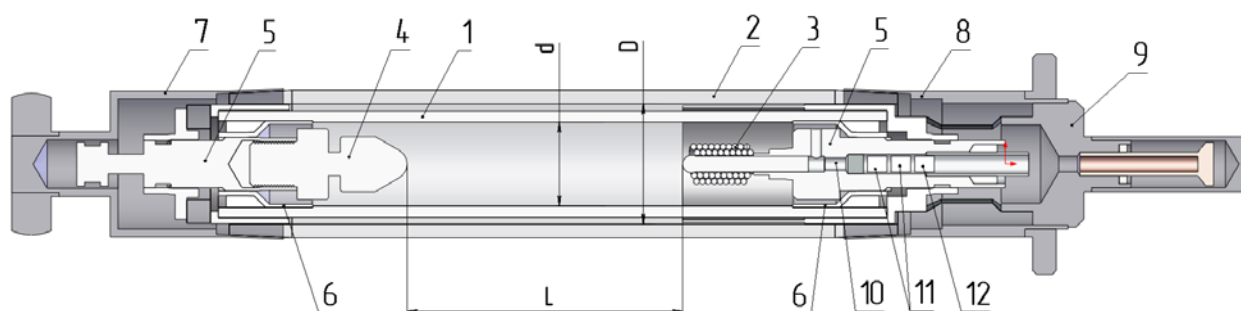


Рисунок 10. Конструкция импульсной газоразрядной лампы с разрядом в цезий – рубидий – ксеноновой смеси.

1 – разрядная трубка, 2 – внешняя оболочка, 3 – катод, 4 – анод, 5 – держатель катода и анода, 6 – герметизирующие колпачки, 7, 8 – токовводы внешней оболочки, 9 – герметизирующая крышка, 10 – технологическое отверстие для наполнения горелки Cs–Rb–Xe смесью, 11 – нитинол, 12 – таблетка бихромата цезия, d, L – диаметр и длина разрядного канала, D – внутренний диаметр внешней оболочки лампы.

**Четвертая глава** посвящена изучению основных эксплуатационных характеристик разработанной цезий – рубидий – ксеноновой лампы. Проведено исследование влияния на параметры ИК излучения параметров электрического питания лампы, величины и длительности импульса напряжения импульсно – периодической структуры. Во всех выполненных экспериментах проводилось сравнение с аналогичными зависимостями для серийной и цезий – калий – ксеноновой лампы (рисунок 11).

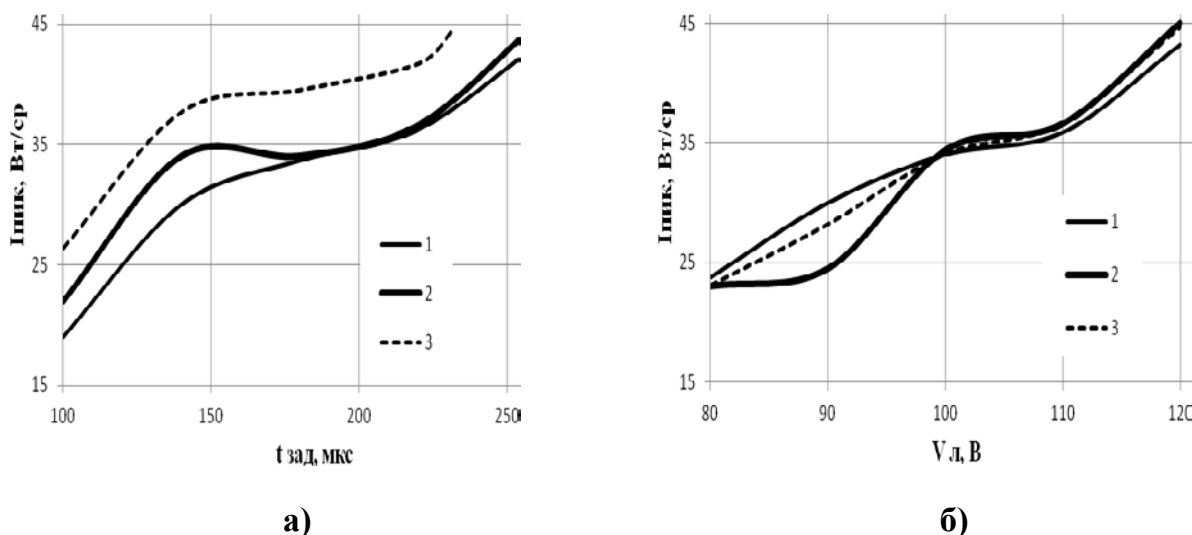


Рисунок 11. Зависимость пиковой силы излучения в спектральном диапазоне 2 от длительности (а) и пикового значения (б) импульса напряжения, прикладываемого к газоразрядным лампам со следующими составами плазмообразующей среды: серийная лампа СП2-1500 (1), 2 мг К – 6 мг Cs (2), 2 мг Rb – 6 мг Cs (3).

Из полученных в диссертации зависимостей сделаны следующие заключения:

1. Пиковая сила излучения в спектральном диапазоне 1 достигает значения 125 Вт/см при длительности импульса напряжения 260 мкс.

2. Наблюдаемое аномальное поведение (наличие минимума) кривых 2 и 3 на рисунке 11 для обоих спектральных диапазонов связано с переходом к разряду в ненасыщенных парах.

Используя в замен серийной лампы источник ИК излучения с разрядом в цезий – рубидий – ксеноновой смеси (2 мг Rb, 6мг Cs и 70 мм рт. ст. Хе), можно при  $P_{уд.} = 430$  Вт/см повысить интенсивность излучения ОЭС в 1,3 раза.

В результате проведенных в главе исследований разработанного источника ИК излучения на устойчивость к механическим и климатическим воздействиям по группе исполнения 2У ГОСТ РВ 20.39.414 и достигнутой долговечности лампы 175 часов при удельной мощности 430 Вт/см подтверждена правильность принятых конструкторских и технологических решений.

Для сохранения эффективности противодействия ОЭС необходимо, чтобы при быстром повороте излучателя в направлении ГСН газоразрядная лампа сохраняла неизменными свои электрические параметры и характеристики излучения. В случае серийного источника ИК излучения наблюдается нестабильность импульсов тока (рисунок 12,а), обусловленная изменением теплофизического состояния лампы при перемещении в новое положение.

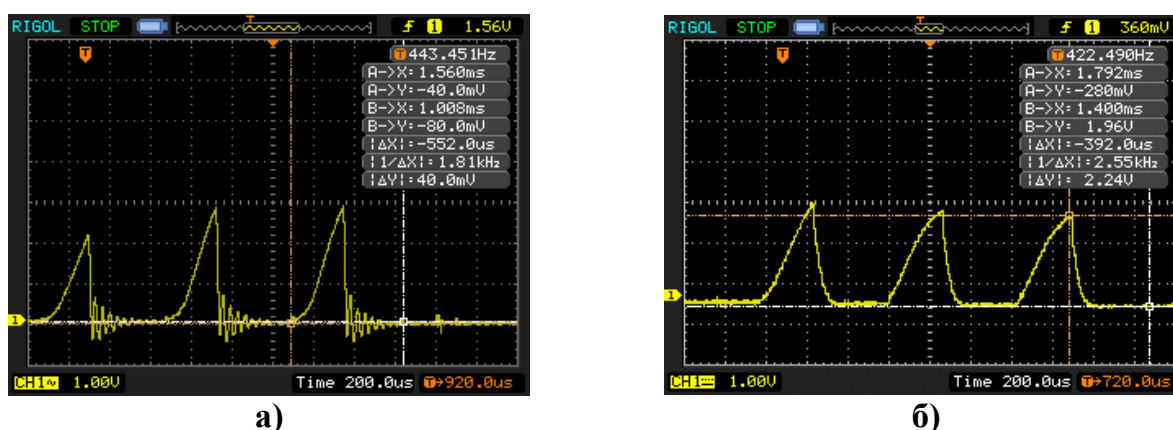


Рисунок 12. Осциллограммы импульсов тока (серийной лампы СП2-1500 (а) и разработанной лампы СП4-1500 (б) с разрядом в цезий – рубидий – ксеноновой смеси при повороте лампы с вертикального в горизонтальное положение.

В главе проведен анализ возможных механизмов, влияющих на состояние плазмы щелочных металлов (катафорез, радиальная диффузия атомов, конвекция и т.д.) и доказано, что преобладающим процессом, снижающим стабильность разряда, является конвекция. Для исключения этого явления предложено применить двухполярное электрическое питание газоразрядной лампы. Наиболее простым техническим решением является изменение полярности каждой последующей серии импульсов напряжения (рисунок 5,б), формируемой последовательным включением транзисторов ТК2 и ТК3. В результате реализации предложенного схемного решения была достигнута стабильность по амплитуде всех токовых (излучения) импульсов из серии импульсно – периодической структуры (рисунок 12, б).



## 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 разрядной трубки от средней электрической мощности разряда, пиковой силы излучения в спектральных диапазонах 1 и 2 от радиуса разрядной трубки, КПД излучения в спектральном диапазоне 2 от удельной электрической мощности.

4. Показано расчетным путем:

- пиковая сила 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 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 нм стремится к нулю.

5. Доказано в результате проведенного термодинамического анализа разряда в парах 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 и способа герметизации рабочего объема, обеспечивающие 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 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.

#### **Основные публикации по теме диссертационной работы.**

Основное содержание диссертации опубликовано в 43 печатных работах; в их числе 12 статей в российских и иностранных журналах, 12 докладов на Российских и международных научно-технических конференциях, 25 патентов на полезную модель.

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

1. 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.

2. **Логинов В.В.** Характеристики излучения импульсно – периодического разряда в парах щелочных металлов//Прикладная физика. – 2019. №4. – С. 24 – 28.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Гавриш С.В., Логинов В.В. Материалы оболочек разрядных ламп высокого давления. Сапфир // Технология машиностроения. – 2009. № 4. – С. 5-9.

#### **Основные патенты:**

1. Патент РФ (полезная модель) № 72578. Модулируемый источник инфракрасного излучения. МПК H01J 61/52 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов и др. // 20.04.2008, Бюл. №11.

2. Патент РФ (полезная модель) № 92741. Разрядный источник инфракрасного излучения для устройства оптико-электронного противодействия инфракрасным головкам самонаведения управляемых ракет. МПК H01J 61/52 /С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов и др.// 27.03.2010, Бюл. №9.

3. Патент РФ (полезная модель) № 103669. Импульсная разрядная лампа инфракрасного излучения. МПК H01J 61/34 /С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина и др. // 20.04.2011, Бюл. №11.

4. Патент РФ (полезная модель) № 111348. Газоразрядный источник инфракрасного излучения для устройства оптико-электронного противодействия. МПК H01J 61/30 / С.В. Гавриш, А.И. Кобзарь, В.В. Логинов и др. // 10.12.2011, Бюл. №34.
5. Патент РФ (полезная модель) №153815. МПК H01J 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.
6. Патент РФ (полезная модель) № 130750. Токоввод в газоразрядную лампу с цезиевым наполнением /МПК H01J 61/02 /С.В. Гавриш, В.В. Логинов, С.В. Пучнина, и др. // 27.07.2013. - Бюл. №21.
7. Патент РФ (полезная модель) №159078. Источник инфракрасного излучения для устройства оптико-электронного противодействия. МПК H01J 61/00/ С.В. Гавриш, В.В. Логинов, А.В. Сурдо, и др. // 27.01.2016, Бюл. №3.
8. Патент РФ (полезная модель) №171875. Источник инфракрасного излучения для устройства оптоэлектронного противодействия. МПК H01J 61/56/ С.В. Гавриш, В.В. Логинов, А.В. Сурдо, и др. // 20.06.2017, Бюл. №17.
9. 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.

#### **Основные конференции:**

1. **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.
2. Мощные импульсные разряды с широкодиапазонным спектральным составом излучения /С.В. Гавриш , В.М. Градов , В.В. Логинов и др.// Тез. докл. VII Международ. светотехн. конф. - Хабаровск, 2009. – С. 156.
3. Влияние режимов электрического питания и условий эксплуатации на характеристики импульсной цезиевой лампы // С.В. Гавриш, М.А. Левкин, В.В. Логинов и др. / Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. Материалы Международной научно - технической конференции «INTERMATIC-2011», часть 1 - М.: Энергоатомиздат, 2011- С. 223-228.
4. Модулируемые источники ИК излучения с сапфировой оболочкой - новый класс газоразрядных ламп / Гавриш С.В., Градов В.М., В.В. Логинов и др.// Высокие технологии, экономика, промышленность. Т.3, Ч.1: Сборник статей тринадцатой международной научно - практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности экономике» - СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2011. - С. 217-223.
5. Гавриш С.В., Логинов В.В., Петренко Н.Ю., Пучнина С.В. Использование сапфировых труб, выращенных по методу А.В. Степанова, в качестве оболочек газоразрядных ламп // XXIII Петербургские чтения по проблемам прочности// Сб. материалов. - СПб.: Изд- во ВВМ, 2018. - 380 с.