

На правах рукописи



**Гавриш Сергей Викторович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА  
ИК ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗРЯДОМ В ПАРАХ ЦЕЗИЯ**

**01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Москва – 2005**

Научный руководитель:

Градов В.М. - доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Любченко Ф. Н. - доктор физико-математических наук

Камруков А. С. - кандидат технических наук, доцент

Ведущая организация: РНЦ «Курчатовский институт» РАН

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1708739

Гавриш С.В. Разработка И И

Защита состоится «30» марта 2005 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.212.141.08 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус факультета «Энергомашиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана, ауд. 614-2

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, Москва, 2-ая Бауманская ул. д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Ученому секретарю диссертационного совета Д.212.141.08.

Автореферат разослан «24» 02 2005 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент

Копосов Е.Б.

Сел в копилку

735

Актуальность работы. В настоящее время источники излучения инфракрасного диапазона (ИК) широко используются в научных исследованиях, медицине, промышленности и военном деле. Одним из важнейших применений является использование ИК источников в системах оптико – электронного противодействия головкам самонаведения (ГСН) зенитных управляемых ракет для защиты летательных аппаратов (ЛА). Для этих целей необходимо, чтобы источник работал в импульсном или импульсно-периодическом режимах генерации некогерентного модулированного излучения в спектральных диапазонах от 3,5 мкм до 5,5 мкм (ИК приёмники ГСН на базе PbS, диодные матрицы и др.). Используемые в настоящее время нагревательные элементы с модуляцией постоянного излучения механическими затворами имеют низкий КПД и не обеспечивают возможность создания импульсно-периодической структуры выходного лучистого потока с заданными энергетическими характеристиками. Импульсные лампы (далее лампы) с разрядом в инертном газе (ксеноне, криптоне и т.д.) позволяют добиться сложной структуры потока излучения за счет модуляции разрядного тока, но они имеют спектр излучения близкий к непрерывному (низкий КПД в ИК диапазоне), который ограничивается длинноволновой границей пропускания кварца (~4 мкм), используемого в качестве оболочки лампы.

Острая потребность в лампах, свободных от указанных недостатков, привела к созданию нового класса селективных источников излучения, а именно, ламп с разрядом в парах щелочных металлов. Как следует из зарубежной печати, наиболее перспективным при создании ИК источника является импульсный разряд высокого давления в парах цезия. В настоящее время за рубежом для защиты ЛА от ракет нового поколения разработаны станции 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  $A=50$  Вт/ср и глубину модуляции не менее  $m=95\%$  в спектральном интервале 3,5 - 5,5 мкм при средней потребляемой мощности не более 3 кВт.

Отечественных разработок аналогичных ламп в настоящее время не существует, а имеющаяся информация о характеристиках, конструкции, технологии изготовления зарубежных излучателей и физике протекающих в них процессов либо весьма отрывочна, либо отсутствует вовсе. Вместе с тем, рассматриваемые источники излучения являются весьма сложными изделиями электронной техники с широкой номенклатурой нелинейных теплофизических процессов, определяющих их функциональные параметры, и труднопрогнозируемой зависимостью спектрально- энергетических и эксплуатационных характеристик от конструктивных особенностей и режимов их работы. В итоге оказывается, что создание таких источников невозможно без детального исследования всего комплекса физических явлений, развивающихся в плазме разряда, стабилизирующих его оболочках и внешней электрической цепи с максимальным привлечением методов и средств математического эксперимента. Все выше-

сказанное выдвигает в качестве актуальной задачу полной конструкторско-технологической проработки ИК-источников на базе расчетно-теоретического и экспериментального исследования физики процессов в элементах изделия.

Целью работы является проведение исследований по созданию высокоэффективных источников излучения на основе импульсного разряда высокого давления в парах цезия для оптических систем противодействия ракетам с инфракрасными головками самонаведения.

Для достижения этой цели решаются следующие задачи:

- разработка технических требований к источнику излучения и выявление конструктивных и технологических предпосылок создания нового типа импульсных ламп с цезиевой плазмообразующей средой;
- расчетные исследования импульсного разряда в парах цезия, направленные на формирование детальной картины физических процессов в плазме и стабилизирующих разряд оболочках, а также выявление основных параметров, влияющих на технические характеристики ИК излучения ламп;
- установление факторов, определяющих омическое сопротивление лампы в процессе остывания, и изучение способов надежного зажигания разряда в различных температурных условиях;
- экспериментальное изучение зависимости характеристик ИК излучения импульсного разряда в парах цезия от конструктивных характеристик, параметров электрической схемы питания и условий эксплуатации ламп;
- проведение конструкторских и технологических проработок импульсных цезиевых ламп, исследование свойств используемых материалов (оптическое пропускание, механическая прочность и т.д.) для обеспечения требуемых излучательных характеристик и надежности ИК источника;
- изучение перспектив дальнейшего совершенствования данного класса ламп.

Объектом исследований являются импульсные лампы с двумя сапфировыми оболочками с разрядом в парах цезия, отличающиеся конструкцией, размерами, рабочим наполнением, режимами электрического питания и условиями эксплуатации.

Научная новизна. В диссертации разработан новый тип источников излучения, дающий начало целому классу приборов специального назначения.

1. Разработана математическая модель, впервые в комплексе описывающая физические процессы в цезий – ртуть – ксеноновой плазме и стабилизирующих разряд оболочках, создан алгоритм реализации соответствующей системы уравнений, сформирована база данных по материальным функциям плазмы и материала оболочек.

2. Впервые расчетным путем получены данные по температурным полям в лампе, структуре баланса мощности, сбрасываемой разрядом и оболочками, спектральному распределению излучения и глубины модуляции в зависимости от удельной мощности разряда

3. Разработаны оригинальная универсальная экспериментальная установка и методики исследования импульсного разряда в парах щелочных металлов, позволяющие изучать импульсные ИК источники при различных режимах питания и эксплуатации.

4. Выявлены особенности зажигания Cs – Hg – Xe разряда, установлено влияние конструктивных параметров, условий электрического питания и охлаждения на излучательные характеристики ламп в ИК диапазоне спектра.

5. Проведены исследования различных вариантов конструкций и соответствующих технологических решений, направленные на обеспечение необходимых характеристик излучения и срока службы ламп. Предложено оригинальное конструктивное исполнение электродных узлов, разработаны способы соединения сапфировых баллонов с металлическими деталями, изучены прочностные свойства и оптические характеристики сапфировых оболочек, выбран тип наполнения внешней колбы лампы и его давление.

6. Определены и экспериментально подтверждены перспективные направления дальнейшего увеличения пиковой силы излучения.

7. Разработана методика исследования и изучен энергетический баланс импульсных ламп с Cs–Hg–Xe разрядом в спектральном диапазоне 0,3 – 10,6 мкм.

Практическая ценность работы. Результаты проведенных исследований позволили впервые в России разработать и приступить к серийному выпуску ламп СП-2500, СП-2500-1, СП2-1500 с двумя оболочками из искусственного сапфира на основе импульсного разряда в парах цезия и ртути, предназначенных для систем оптико-электронного противодействия ГСН управляемых ракет. В диссертации приведены акты об использовании результатов диссертации в производстве ламп в ОАО СКТБ «Ксенон» (г. Москва) и изделий, разработанных в ОАО «НИИ «Зенит» (г. Москва) и ФГУП «Экран» (г. Самара).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на Международном семинаре «МЭИ Светотехника 1992», (Москва, 1992г.), на II (Суздаль, 1995г.), III (Новгород, 1997г.) и IV (Вологда, 2000г.) Международных светотехнических конференциях, Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (Москва, 2003г.), на научных семинарах и совещаниях в ОАО «СКТБ «Ксенон», ОАО «НИИ «Зенит», ВНИИС им. А.Н. Лодыгина, ВНИСИ им. С.И. Вавилова,

На защиту выносятся:

- методика вычислительного эксперимента, включающая построение математической модели физических процессов в цезий–ртутной плазме и стабилизирующих разряд оболочках, алгоритма реализации соответствующей системы уравнений и базы данных по материальным функциям и коэффициенту поглощения;

- расчетные данные по составу Cs – Hg – Xe плазмы, температурным полям в разряде и оболочках, структуре баланса мощности, сбрасываемой оболочками,

спектральному распределению глубины модуляции в зависимости от удельной мощности разряда:

- результаты изучения факторов, определяющих сопротивление лампы после выключения, условий надежного зажигания и выхода на рабочий режим, влияние на излучательные характеристики конструктивных параметров, условий электрического питания и охлаждения ИК источника;
- методики расчета тангенциальных напряжений в зоне соединения оболочки с металлом, определения предельных прочностных характеристик и оптических свойств сапфировых труб;
- расчетно-экспериментальные данные по изучению направлений повышения излучательных параметров ИК источников и результаты исследования энергетического баланса излучения Cs – Hg – Xe ламп.

Личное участие автора в расчетно – теоретических работах, выполненных в соавторстве, заключается в непосредственном их выполнении или равноправном участии в формировании содержательной модели и систем уравнений с комплексом граничных условий, проведение численных экспериментов по разработанным программам, анализе адекватности моделей, корректировке расчетных схем и интерпретации полученных результатов. В работах, посвященных экспериментальным исследованиям, личный вклад автора заключается в непосредственном выполнении, участии в постановке задач или руководстве исследованиями, разработке методик испытаний и технических решений, анализе результатов. В итоге автор внес решающий вклад в разработку вопросов, рассматриваемых в диссертационной работе.

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 18 печатных работах, включая три патента.

Структура работы. Диссертация изложена на 135 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит список литературы (166 наименований), 46 страниц иллюстраций (66 рисунков), 17 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении показана актуальность темы, сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна полученных результатов, показана практическая ценность работы, перечислены положения, выносимые на защиту. Определены основные излучательные характеристики ламп рассматриваемого назначения – пиковая сила  $A$ , постоянная составляющая  $A_n$  и длительность импульса излучения по уровню 0,5 от максимального значения  $t_{0,5}$ , глубина модуляции, рассчитываемая по формуле:  $m = [A - A_n]/A \cdot 100\%$ .

В первой главе проведен анализ зарубежных технических решений импульсных ИК источников на основе разряда в парах щелочных металлов. Показана технологическая возможность создания такого источника на базе отечественных достижений в области ламп накачки лазеров и технологии выра-

шивания сапфировых труб по методу Степанова. Выявлены основные конструктивные и эксплуатационные особенности разрабатываемого источника: наполненная Cs – Hg – Xe смесью сапфировая разрядная трубка расположена во внешней оболочке из того же материала, которая заполнена газом-теплоносителем с принудительным охлаждением воздушным потоком снаружи. Данная конструкция лампы была взята в качестве базовой при разработке математической модели, позволяющей расчетным путем получить прогнозируемые параметры и выделить основные направления экспериментальных исследований.

Для рассматриваемого типа разрядов характерны диапазоны температур  $(3-10) \cdot 10^3 \text{ K}$  и давлений  $(0,01-0,5) \text{ МПа}$ . Показано, что наличие неравновесной пристеночной зоны (порядка 0.2-0.4 от внутреннего радиуса  $R$  разрядной трубки) не сказывается существенным образом на результатах расчетов, выполненных без учета неравновесности. Это позволяет строить модель разряда в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР), которая включает уравнения сохранения энергии (1.1), неразрывности (1.2), переноса излучения в плазме (1.3) – (1.5), сохранения массы в замкнутом объеме (1.6), закона Ома (1.7), (1.8), уравнения внешней электрической цепи (1.9), (1.10) и для достаточно длинных разрядных промежутков в условиях цилиндрической симметрии имеет вид:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + c_p \rho \cdot V \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda(T, p) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \sigma(T, p) E^2 - \text{div} F + \frac{dp}{dt}, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V \rho) = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{div} F = c \int_0^\infty k_\lambda(T, p, \lambda) \cdot [U_{\lambda p}(T) - U_\lambda] \cdot d\lambda, \quad (1.3)$$

$$F_\lambda = - \frac{c}{3k_\lambda} \frac{dU_\lambda}{dr}, \quad (1.4)$$

$$\text{div} F_\lambda = c k_\lambda (U_{\lambda p}(T) - U_\lambda) \quad (1.5)$$

$$\frac{p^0}{kT^0} = \frac{2}{R^2} \int_0^R n_T(r, p) r dr, \quad (1.6)$$

$$R_p = \frac{L}{2\pi \cdot \int_0^R \sigma(T, p) \cdot r dr}, \quad (1.7)$$

$$E = IR_p / L, \quad (1.8)$$

$$L_k \frac{dI}{dt} + (R_k + R_p) \cdot I - U_c = 0, \quad (1.9)$$

$$\frac{dU_c}{dt} = - \frac{1}{C_k} I. \quad (1.10)$$

В приведенной системе приняты следующие обозначения:  $T$  – температура плазмы, единая для легких и тяжелых частиц;  $\sigma, \lambda, k_\lambda$  – коэффициенты электро- и

теплопроводности и оптического поглощения плазмы с учетом вынужденного испускания;  $c_p, \rho, p$  – теплоемкость, плотность и рабочее давление в разряде;  $R, L$  – радиус и длина разрядного канала;  $c$  – скорость света;  $E, F$  – напряженность электрического поля и плотность интегрального по спектру потока излучения в точке с текущей радиальной координатой;  $F_\lambda$  – плотность спектрального потока излучения;  $U_{\lambda p}, U_\lambda$  – равновесная объемная плотность энергии излучения и объемная плотность энергии излучения, устанавливающаяся в плазме;  $p^0, T^0$  –

начальное давление наполнения и температура плазмообразующей среды;  $\Pi r$  – радиальное распределение тяжелых частиц в разряде;  $R_p, L_k, C_k, R_k, U_c, I$  – электрическое сопротивление плазмы, индуктивность, емкость и сопротивление разрядного контура, напряжение на конденсаторе, электрический ток.

Для учета влияния излучения разогретых оболочек на состояние цезиевой плазмы математическая модель дополняется уравнениями энергии (теплопроводности) для двух оболочек с зазором между ними, заполненным газом. При этом спектральный поток излучения в оболочках в области полупрозрачности сапфира рассчитывается в приближении Шустера – Шварцшильда для цилиндрического слоя. Решение сформулированной системы дифференциальных уравнений осуществляется методом конечных разностей с применением итерационной процедуры, состоящей из множества вложенных циклов. В главе подробно рассмотрен алгоритм, реализующий общую модель нестационарного разряда с учетом системы излучающих оболочек.

Теплопроводность плазмы вычислялась с учетом электронной, атомной, ионной составляющих и переноса энергии ионизации. Для расчета электропроводности и электронной составляющей теплопроводности использован метод Фроста. При расчете коэффициента поглощения  $k_\lambda$  учитывались как отдельные спектральные линии, так и непрерывный фон. В работе представлены температурная зависимость состава плазмы и спектральный коэффициент поглощения цезиевой плазмы при температурах, характерных для источников инфракрасного излучения.

В результате реализации математической модели получено радиальное распределение температуры в плазме и системе двух поглощающе-излучающих оболочек (рис. 1) при различных удельных электрических мощностях  $P_{уд}$ , определяющее излучательные параметры разрабатываемого источника: пиковую силу импульса излучения  $A$  и глубина модуляции  $m$ . Показано, что при изменении электрической мощности от 155 до 1100 Вт/см, температура в центре разряда изменяется от 4800 до 7500 К, разрядной трубки от 1000 до 2250 К, основное падение температуры приходится на зазор между оболочками. С ростом температуры оболочек от 700° до 2300°К коэффициент поглощения сапфира увеличивается почти на порядок, одновременно происходит сдвиг максимума функции распределения Планка для нагретых оболочек с 3 до 1,3 мкм (см. рис. 2), что приводит к увеличению постоянной составляющей импульса излучения (ПСИ)  $A_0$  и, соответственно, к снижению глубины модуляции. Показано, что для снижения ПСИ необходимо оптимизировать условия охлаждения,



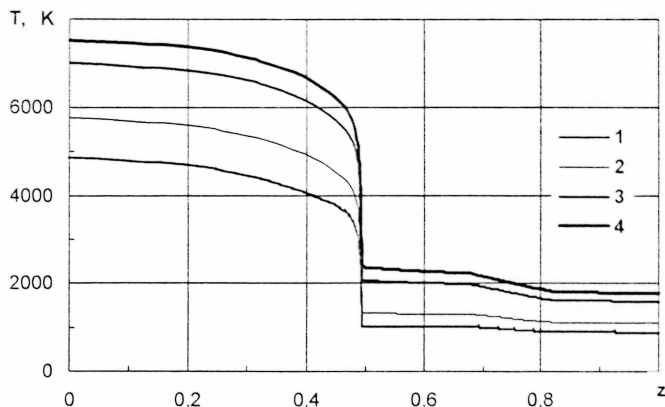


Рис. 1. Температурное распределение в Cs – Hg – Xe разряде и оболочках.

Давление в разряде  $p=0.5$  МПа,  $R=0.35$  см, соотношение компонент Cs:Hg=1:1.5 и Cs:Xe=1:1;  $P_{уд} = 155$  (1), 320 (2), 800 (3), 1100 (4) Вт/см. Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности лампы –  $0.001$  Вт/см<sup>2</sup> К, толщины стенки внутренней оболочки, зазора и внешней оболочки –  $0.13$ ,  $0.1$  и  $0.13$  см, соответственно.

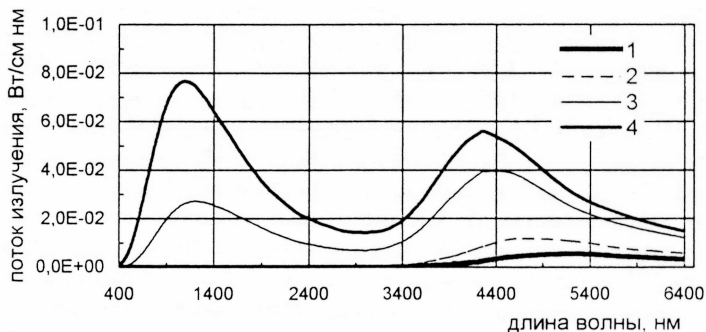


Рис. 2. Спектральное распределение излучения оболочек в момент погасания разряда для  $P_{уд} = 155$  (1), 320 (2), 800 (3) и 1100 (4) Вт/см при коэффициенте теплоотдачи  $0,001$  Вт/см<sup>2</sup>

соотношения компонент наполнения, коэффициент пропускания материала. Полученные данные по спектральному распределению глубины модуляции и КПД излучения, балансу рассеиваемой оболочками мощности показали, что рост удельной электрической нагрузки не позволяет заметно поднять глубину

модуляции в ИК диапазоне. По результатам расчетов рекомендовано оптимизировать в качестве факторов наиболее сильно влияющих на пиковую силу излучения: диаметр разрядного промежутка, давление ксенона и паров ртути, параметры дежурной дуги и разрядного контура.

Во второй главе рассмотрены результаты экспериментального исследования импульсных ламп с разрядом в парах цезия. Отсутствие информации по условиям эксплуатации, особенностям конструкции ламп и многообразие факторов, определяющих излучательные характеристики разрабатываемого источника, потребовали проведения серьезных экспериментальных работ.

В работе подробно изучены вопросы зажигания цезиевых ламп, т.к. после отключения тока, но при сохранении воздушного принудительного охлаждения на внутренней поверхности разрядной трубки образуется проводящая пленка щелочного металла, соединяющая электроды и исключаящая повторный пробой лампы зажигающим высоковольтным импульсом. При этом сопротивление лампы  $R_n$  достигает стабилизированного значения 250 кОм за 100 секунд с момента выключения. Без эксплуатации сопротивление ламп может находиться в интервале от 0,2 до 60 кОм, что связано с неравномерностью толщины пленки, определяемой качеством внутренней поверхности (волнистостью) горелки, температурными условиями хранения и т.д.

Для зажигания таких ламп в работе предложен способ, основанный на том, что через образовавшуюся плёнку с сопротивлением  $R_n$  пропускается ток, происходит быстрый нагрев и испарение щелочного металла со стенок, приводящие к разрыву проводящего слоя и возникновению микроразрядов в местах испарения, которые затем распространяются на весь разрядный промежуток. Из-за широкого диапазона сопротивлений пленки цезия (0,2 – 250 кОм) для зажигания разряда необходимо выполнение следующей последовательности подачи напряжений на лампу:

- $U_{max}=300$  В,  $I_{max}=1,5$  А (для зажигания лампы с  $R_n < 1,0$  кОм);
- $U_{max}=1800$  В,  $I_{max}=0,3$  А. (для  $1,0$  кОм  $< R_n < 150$  кОм);
- $U_{пик.}=8-10$  кВ,  $t_{0,5}=0,25$  мкс,  $f=10$  Гц (для  $R_n > 150$  кОм).

Важной характеристикой ИК источника является время выхода на номинальные значения параметров (время готовности лампы). Для обеспечения долговечности ИК источника в работе предложен способ включения лампы со ступенчатым увеличением подаваемой мощности за счет наращивания частоты следования рабочих импульсов. Изучены процессы происходящие в разрядном объеме и исследованы изменения спектральных характеристик в УФ диапазоне с момента зажигания до выхода в рабочий режим. Получено, что в течение 5 минут с момента зажигания при наращивании мощности со средней скоростью 6,5 Вт/сек в УФ спектре исчезают большинство линий Hg и Xe и разряд происходит преимущественно в парах Cs. Показана связь происходящих процессов с ростом напряжения дежурной дуги и пиковой силы импульса излучения.

С учетом особенностей зажигания и выхода в номинальный режим для проведения исследований был разработан и изготовлен универсальный блок питания лампы (рис. 3), обеспечивающий работу лампы в разрядном контуре с переменными параметрами ( $L = 28,5 \div 158$  мкГн;  $C = 2 \div 158$  мкФ) при мощности до

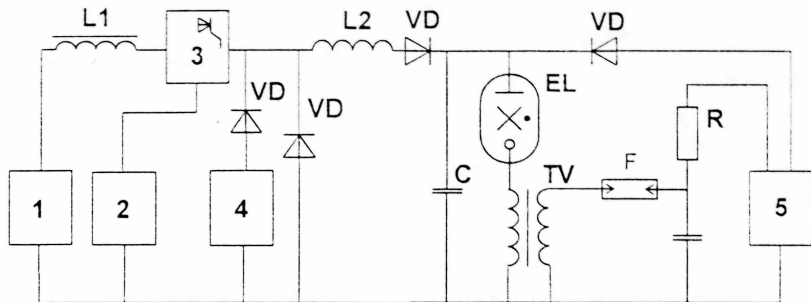


Рис. 3. Функциональная схема включения цезиевой лампы.

1—выпрямитель, 2—блок управления, 3—тиристорный модулятор, 4—блок дежурной дуги, 5—источник подпитки, EL - лампа, R - зарядное сопротивление. C – рабочий конденсатор, VD - диоды, L1 - дроссель НЧ, L2 – рабочая индуктивность, TV –трансформатор высоковольтного поджига, F-разрядник.

5 кВт и частоте следования токовых импульсов 400÷500 Гц.

В работе подробно рассмотрены вопросы регистрации характеристик ИК излучения, обработки полученных результатов, метрологической аттестации средств измерения и оценки погрешности получаемых данных. Разработанный комплекс оборудования позволяет производить машинную обработку сигналов.

С использованием описанного комплекса была исследована зависимость излучательных характеристик от конструктивных параметров ламп: диаметра  $d$  и межэлектродного расстояния  $l$ , типа и дозировки Cs и Hg, их весового соотношения, давления Хе в горелке и газа-теплоносителя между оболочками; толщины стенки разрядной трубки; наличия отражающих покрытий на внешней колбе.

В диапазоне исследованных диаметров 5÷9 мм и дозировок цезия от 6 до 9 мг по совокупности излучательных критериев ( $m$ ,  $A$ ,  $t_{0,5}$ ) лучшие результаты получены на лампе  $d=7$  мм и  $l=90$  мм (далее 7/90) с наполнением 9 мг Cs, 3 мг Hg, 50 мм рт. ст. Хе при  $P_{\text{эл}}=160$  Вт/см<sup>2</sup>. Выявлено, что с введением ртути в разряд при росте мощности на лампе в ИК диапазоне увеличивается как пиковая сила, так и глубина модуляции излучения (рис. 4).

При рассмотрении остальных параметров конструкции ламп получено:

- для снижения времени спада заднего фронта импульса излучения и увеличения  $m$  необходимо использовать давление ксенона 50 мм рт. ст.;
- при уменьшении толщины стенки на 40% глубина модуляции возрастает на 0,7%, но при этом снижается механическая прочность и надежность лампы;
- отражающее покрытие  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  (спектральный диапазон отражения 0,6-1 мкм) на внешней колбе приводит к перегреву оболочки горелки и снижению  $m$  на 2-2,5% при мощности 1 кВт и на 10% при 1,35 кВт.

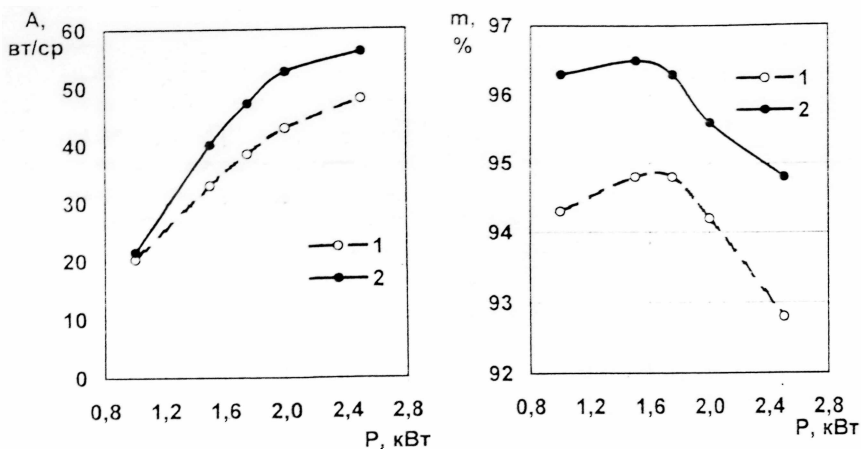


Рис. 4. Зависимость пиковой силы  $A$  и глубины модуляции  $m$  от потребляемой мощности для ламп с наполнением: 1 - 9 мГ Cs + 170 мм рт. ст. Xe, 2 - 9 мГ Cs + 3 мГ Hg + 50 мм рт. ст. Xe,

В работе подробно изучено влияние условий электрического питания и охлаждения на излучательные характеристики ИК источников. В проведенных исследованиях лампа работала с использованием режима дежурной дуги, непрерывное горение которой является источником немодулируемого излучения. Выявлено, что при работе без дежурной дуги  $m$  на 0,3-0,5% выше, но излучение характеризуется временной и амплитудной нестабильностью, что для рассматриваемого ИК источника неприемлемо. Изучение влияния тока дежурной дуги ( $I_{дд}$ ) на  $m$  показало, что уже при  $I_{дд}=1$  А и более исчезает амплитудная нестабильность, а увеличение тока  $I_{дд}$  с 1,0 до 2,0 А приводит к снижению глубины модуляции на 1%. По этой причине дальнейшие исследования в данной работе проводились при токе дежурной дуги 1,0 А.

КПД и характеристики излучения лампы зависят от режимов питания, определяемых параметрами разрядного контура: величинами емкости  $C$  и индуктивности  $L$ . Показано, что увеличение индуктивности изменяет форму импульса тока через лампу, главным образом, на первой стадии разряда. Так для  $L=29$  мкГн скорость достижения максимального значения тока составляет 3,5 кА/с, а для  $L=44$  мкГн и  $L=73$  мкГн равна, соответственно 2,5 кА/с и 2,2 кА/с. Высокая скорость роста тока приводит к снижению долговечности, а низкая к уменьшению  $m$ . Поэтому в результате оптимизации разрядного контура получено, что пиковая сила излучения резко увеличивается до 50 Вт/см² с ростом энергии импульса до 3 Дж. При этом оптимальными параметрами разрядного контура являются  $C=40$  мкФ,  $L=50$  мкГн.

Постоянная составляющая излучения нагретых оболочек существенно зависит от характеристик охлаждающего потока: расхода  $Q$  и скорости  $v$  воздуха вдоль оболочки, который формировался при помощи конического сопла. В результате исследований необходимые излучательные характеристики для ламп с цезиевым наполнением достигнуты при расходе воздуха  $Q > 92$  м³/час, а для цезий-ртутных ламп при  $Q < 92$  м³/час. При этом определяющим фактором режи-

ма охлаждения ламп является скорость хладагента  $v$  вдоль оболочки, поэтому в работе предложено использовать систему двух конусов (конус в конусе), обеспечивающую равномерный ламинарный поток воздуха вдоль оболочки в зоне разрядного промежутка со скоростью 90м/сек. В работе предложена конструкция системы охлаждения для систем противодействия.

В третьей главе приведены результаты комплекса конструкторско – технологических исследований, в результате которых была разработана представленная на рис.5 конструкция сапфировой лампы с двумя оболочками, предусматривающая возможность перемещения более разогретой горелки ( $T_{ог.}=1500^{\circ}\text{C}$ ) внутри термостатирующей оболочки ( $T_{об.}=450^{\circ}\text{C}$ ). Надежность

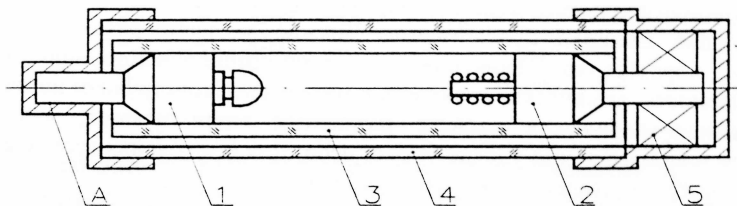


Рис. 5. Конструкция ИК источника с Cs- Hg -Xe разрядом.

1–анод, 2–катод, 3– разрядная трубка, 4– внешняя колба, 5–подвижный контакт, А– зона механического обжима неподвижного контакта.

лампы определяется механической прочностью и герметичностью соединений сапфир – металл. Предложен способ определения критического напряжения разрушения сапфировых труб в зависимости от свойств кристалла (блочность), температуры и способов обработки (шлифовка, полировка). На рис.6 представ-

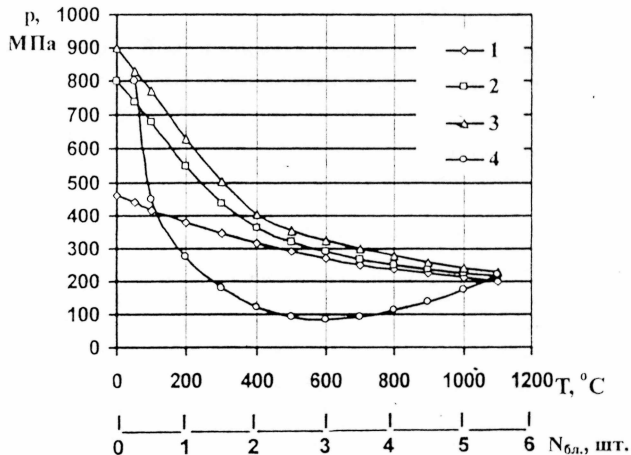


Рис. 6. Зависимость механической прочности сапфировых оболочек из от количества блоков  $N_{бл}$  (кривые 1-3) при толщине стенок  $h=1,35$  мм (1); 1,4 мм (2); 1,45 мм (3); и температуры безблочной трубы (4) с  $h=1,4$  мм.

лена полученная экспериментальная зависимость от некоторых перечисленных факторов. В работе разработана методика расчета остаточных напряжений, построенная на решении задачи Ляме для системы двух цилиндров и проведены расчетные оценки напряжений в зоне спаев ниобий-сапфир и ковар- сапфир.

От конструкции электродов существенно зависит их тепловой режим, который, в свою очередь, влияет на характеристики лампы (налеты на разрядной трубке, температура холодной точки и т.д.). Проведены расчетные оценки размеров анода с учетом плотности тепловых потоков из плазмы и за счёт джоулевого нагрева током, проходящим через электрод. Предложена конструкция катодного узла лампы, обеспечивающая наполнение горелки рабочим веществом и фиксирование холодной точки в строго определенном месте для стабилизации излучательных характеристик источника.

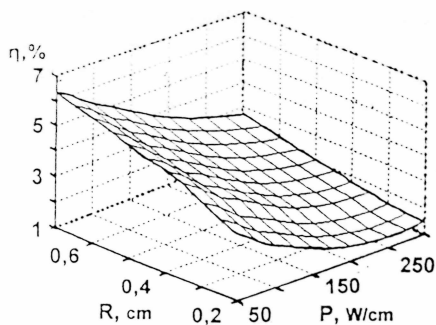
Наполнение внешней колбы лампы должно удовлетворять следующим требованиям: хорошая теплопроводность, высокий потенциал ионизации, низкая газопроницаемость, химическая стойкость к материалам конструкции источника. Анализ физико-химических свойств различных газов показал, что этим требованиям наиболее полно удовлетворяет неон. Для исключения пробоя между оболочками выбрано давление Ne равное 700 мм рт. ст.

В результате конструкторско – технологических исследований разработан вариант ИК источника, на котором достигнута долговечность 150 часов при удельной нагрузке  $125 \text{ Вт/см}^2$  и устойчивость к механо – климатическим воздействиям по группе исполнения 2У ГОСТ РВ 20.39.414.1.

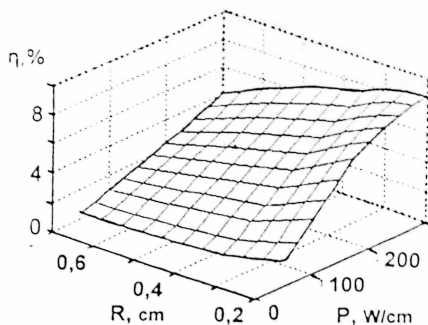
**Четвертая глава** посвящена рассмотрению перспектив дальнейшего развития ламп с разрядом в парах цезия для решения задач противодействия новому классу головок самонаведения, использующим как ИК, так и УФ интервалы спектра. Для этого необходимо обеспечение пиковой силы излучения  $A$  в ИК области (диапазон I: 3,5 - 5,5 мкм) не менее 100 Вт/ср, а в УФ (диапазон II: 0,28 - 0,4 мкм) - более 25 Вт/ср.

С использованием разработанной математической модели, в диапазонах I и II выполнены расчеты пиковой силы излучения  $A$  Cs- Hg -Xe разрядов для трех рабочих давлений смеси  $p = 1, 5$  и 10 ат. при соотношении компонент Cs:Hg=1:1 и Cs:Xe=1,5:1. Размеры разрядного промежутка выбирались равными  $d = 7$  и 13 мм и  $l = 90, 70$  и 50 мм, частота следования импульсов  $f=450 \text{ Гц}$ , длительность импульса - 120 мкс.

Повышение межэлектродного расстояния  $l$  до 70 мм при  $d=13$  мм приводит к росту  $A$  в ИК области и снижению в УФ диапазоне, в то время как увеличение диаметра при  $P_{\text{н}} \geq 1,5 \text{ кВт}$  обеспечивает возрастание пиковой силы излучения в обоих диапазонах одновременно. Это связано с возрастанием в диапазонах I и II КПД лампы, расчетная зависимость которого от мощности и радиуса разрядной трубки приведена на рис.7. Увеличение пиковой силы излучения в обоих диапазонах возможно за счет увеличения мощности на лампе, использования способа электрического питания лампы, обеспечивающего двойные импульсы тока разной продолжительности (наличие предимпульса) при условии одновременной оптимизации  $I_{\text{дл.}}$ , повышение селективности источника за счет активной фильтрации излучения с помощью интерференционных покрытий.



а)



б)

Рис. 7. Зависимость КПД излучения разряда в максимуме тока от средней мощности и радиуса разрядной трубки в интервале спектра 3,5–5,5 мкм (а) и 0,27–0,4 мкм (б) при соотношении компонент Cs-Hg-Xe: 5-1-1.5.

Для экспериментального подтверждения полученных расчетных данных были изготовлены лампы увеличенного диаметра 11/90 (12 мг Cs, 6 мг Hg, 50 мм рт. ст. Хе). В результате исследования экспериментальных ламп 11/90 получено, что увеличение мощности от 1,46 до 2,05 кВт приводит к двукратному росту пиковой силы излучения, достигая значения  $A=120$  Вт/ср при сохранении практически неизменным коэффициента  $m=96\%$ . Удельная нагрузка на поверхность оболочки лампы 11/90 ( $P_{\text{д}}=2,5$  кВт) составляет  $80$  Вт/см<sup>2</sup>, что в 1,5 раза меньше, чем у 7/90. Этот результат позволяет ожидать более высокий срок службы нового цезиевого источника после соответствующей конструкторской и технологической проработки лампы.

Дальнейшее совершенствование ламп связано с расширением областей применения разработанных источников, для чего необходимо знание спектрального распределения и энергетического баланса излучения лампы. В работе приведены результаты спектральных исследований распределения плотности силы излучения на спектрометре СДЛ-1 в диапазоне 0,3–3,5 мкм цезиевой лампы 7/90 при потребляемой мощности 2÷2,5 кВт. Получены следующие значения силы излучения в спектральном диапазоне 0,3–1 мкм — 96 Вт/ср, а для длин волн 1,0–3,5 мкм — 4 Вт/ср.

Исследования ламп 7/90; 11/90 проводились также калориметрическим приемником ИМО-2Н при  $P_{\text{д}}=1,5$  кВт и  $P_{\text{д}}=2,5$  кВт в разрядном контуре с переменными параметрами  $C$  и  $L_{\text{к}}$ . Полученные данные по КПД излучения в спектральных диапазонах:  $0,3 \div 3,0$  мкм;  $0,8 \div 3,0$  мкм;  $2,0 \div 4,0$  мкм;  $3,5 \div 6,0$  мкм;  $0,3 \div 10,6$  мкм в работе представлены в виде таблиц.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые разработана математическая модель разряда, описывающая физические процессы в цезий – ртуть - ксеноновом разряде и учитывающая влияние на спектрально – энергетические характеристики лампы собственного излучения системы разогретых оболочек, сформирована база данных по теплофизическим и оптическим характеристикам цезиевой плазмы, предложен алгоритм решения системы уравнений. В результате реализации модели рассчитаны спектральное распределение излучения разряда, лампы и глубины модуляции, поля температур и концентраций частиц в плазме, параметры теплового режима оболочек, структура баланса мощности, вкладываемой в разряд, и другие характеристики, определяющие функциональное назначение источника, показана их зависимость от удельной мощности разряда и условий теплосъема.

2. Изучены теплофизические процессы в разрядной трубке после выключения лампы, связанные с конденсацией на поверхности цезиевой пленки, шунтирующей высоковольтный поджиг лампы. Предложен новый способ зажигания путем джоулевого разогрева и испарения пленки щелочного металла с поверхности разрядной трубки. Исследованы факторы, влияющие на сопротивление пленки, и определены нагрузочные характеристики блоков, входящих в систему зажигания.

3. Проведенная экспериментальная оптимизация конструкции (диаметр и длина разрядного промежутка, состав наполнения, толщины стенок и т.д.), условий электрического питания (параметры разрядного контура, дежурной дуги, выхода рабочий режим), характеристик охлаждения (скорость и расход воздуха) разработанного ИК источника показала, что при удельных мощностях 270 Вт/см из всех типов импульсных разрядов в парах щелочных металлов наиболее эффективна лампа 7/90 с Cs – Hg – Xe наполнением, позволяющая получать в спектральном диапазоне 3,5 – 5,5 мкм пиковую силу излучения не менее 50 Вт/ср, глубину модуляции 95% при уровнях энергий 4 – 5 Дж.

4. Выполнены исследования прочностных и оптических характеристик сапфировых труб, выявлены зависимости излучательных параметров от окрашивающих примесей, предельных разрушающих напряжений от структурного совершенства монокристалла (блочность, разориентация блоков и т.д.) в интервале температур 0 – 1200 °С, впервые сформулированы требования к техническим характеристикам сапфировых труб, используемых в качестве оболочек разрядной лампы.

5. Впервые разработана конструкция и технология нового отечественного ИК источника, удовлетворяющая повышенным требованиям к изделиям специального назначения по излучательным характеристикам, сроку службы и устойчивости к механо – климатическим воздействиям. Это достигнуто применением разработанных методов расчета элементов конструкции (электродных узлов, соединений металл–сапфир и т.д.), предложенных способов спая, наполнения, герметизации лампы и реализацией результатов выполненных



исследований влияния на характеристики лампы физико – химических процессов, происходящих при выполнении технологических операций (шлифовка, полировка, отжиг и т.д.).

6. На основе расчетных исследований предложены направления дальнейшего повышения КПД цезий – ртуть – ксенонового разряда в ИК и УФ диапазонах спектра: увеличение диаметра разрядного канала, применение новых способов электрического питания. Полученные данные подтверждены результатами испытаний экспериментальных образцов Cs – Hg – Xe лампы в схеме с транзисторным модулятором, обеспечившего при удельной нагрузке 220 Вт/см пиковую силу излучения 120 Вт/см и глубину модуляции 96%.

7. Полученные в работе результаты исследования спектрального распределения средней силы излучения от 0,3 до 3,5 мкм и КПД излучения в нескольких поддиапазонах интервала длин волн 0,3 – 10,6 мкм позволяют расширить сферу применения разработанного источника для решения задач гражданского назначения (нагрев, накачка лазерных сред и т.д.)

8. По комплексу эксплуатационных параметров созданный ИК источник находится на уровне лучшего известного зарубежного аналога. Полученные в работе научно – обоснованные рекомендации по эксплуатации импульсных ИК источников с разрядом в парах цезия полностью используются в изделии оптико – электронного противодействия Л 166В1 отечественного производства

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей / С.В. Гавриш, Е.Н. Гайдуков, Б.А. Константинов и др. // Светотехника. - 1998. №3. - С. 22-24.

2. Gradov V.M., Gavrish S.V. Mathematical modeling of selective emitting nonequilibrium plasma in complex optical systems // Light & Engineering. – 1997. - Vol. 5, No. 3. - P. 16-19.

3. 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.

4. Гавриш С.В., Цогоев И.Т. Сапфировые источники ИК излучения с разрядом в парах щелочных металлов // Тез. докл. IV Международ. светотехн. конф. – Вологда, 2000. – С. 54.

5. Пат. (полезная модель) 32321 (Россия), МПК<sup>7</sup> Н 01J 61/34. Разрядный источник модулируемого инфракрасного излучения /С.В. Гавриш, И.Т. Цогоев, А.И. Кобзарь, В.А. Самодергин // Открытия и изобретения.-2003. - № 25.

6. Пат. 2087984 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> Н 01 J 9/00. Способ изготовления газоразрядной лампы / С.В. Гавриш, Е.Н. Гайдуков, З.Д. Никифорова // Открытия и изобретения. - 1995. - № 28.

7. Гавриш С.В. Исследование световых характеристик импульсных ламп с разрядом в парах щелочных металлов, работающих на частотах до 6 кГц. //Тез. докл. II Международ. светотехн. конф. – Суздаль, 1995. - С. 186.

8. Гавриш С.В. Исследование процессов конденсации паров металла после выключения ламп с щелочными добавками в условиях принудительного охлаждения. // Тез. докл. III Международ. светотехн. конф. - Новгород, 1997. - С. 134.

9. Градов В.М., Гавриш С.В., Новиков В.Е. Математическая модель разряда высокого давления. // Тез. докл. III Международ. светотехн. конф. - Новгород, 1997. - С. 45.

10. Градов В.М., Гавриш С.В. Оптимизация спектров разрядных источников излучения: Тез. докл. III Международ. светотехн. конф. - Новгород, 1997. - С. 132-133.

11. Градов В.М., Гавриш С.В., Корякина Е.А. Компьютерное моделирование процессов в разрядах в парах щелочных металлов, стабилизированных системой излучающих оболочек // Тез. докл. Международ. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам. - М: 2003. -Т.1- С. 208-209.

12. Градов В.М., Гавриш С.В., Гайдуков Е.Н. Математическое моделирование радиационных процессов в системах сложной геометрии с источниками селективного излучения// Тез. докл. III Международ. светотехн. конф. - Новгород, 1997. - С. 130-131.

13. Градов В.М., Гавриш С.В., Колодный Н.П. Математические модели и исследование натриевых ламп высокого давления с ртутным и безртутным наполнением //МЭИ Светотехника 1992: Тез. докл. Международ. семинара. - М.: 1992. - С. 36.

14. Влияние параметров разрядного контура на характеристики излучения импульсных ламп с добавками щелочных металлов / С.Б. Аганичев, С.В. Гавриш, Е.Н. Гайдуков, А.Ф. Сильницкий //Тез. докл. III Международ. светотехн. конф. - Новгород, 1997. - С.136-137.

15. Гавриш С.В., Гайдуков Е.Н., Сысоев П.В. Импульсные лампы с разрядом в парах щелочных металлов для накачки лазера на АИГ:Nd. // Тез. докл. II Международ. светотехн. конф. - Суздаль, 1995. - С. 185.

16. Исследование характеристик натриевых ламп высокого давления с сапфировой оболочкой горелки / В.Б. Браиловский, С.В. Гавриш, Е.Н. Гайдуков и др.// Тез. докл. II Международ. светотехнич. конф. - Суздаль, 1995.- С.48-49.

17. Пат. 109366 (Россия), МПК<sup>6</sup> H01J9/50 Способ восстановления деталей от горелок натриевых ламп высокого давления / С.В. Гавриш, Е.Н. Гайдуков, З.Д. Никифорова // Открытия и изобретения.- 1997.- № 11.

18. Велит В.А., Гавриш С.В., Градов В.М. Конструирование электродов натриевых ламп высокого давления // Тез. докл. II Международ. светотехн. конф. - Суздаль, 1995. - С. 186.

У1708739

Гавриш С.В.  
Разработка и исследование  
импульсного источника ИК  
излучения с разрядом в  
парах цезия  
2005

0-00

У 1708739

**ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ**  
обозначенного здесь срока

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Подписано к печати \_\_\_\_\_ Заказ № \_\_\_\_\_ Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз. Типография МГТУ, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5