

Импульсные газоразрядные источники ИК-излучения для оптико-электронных систем (обзор)

С. В. Гавриш, В. В. Логинов, С. В. Пучнина

В работе последовательно рассмотрены предпосылки создания импульсных цезий–ртуть–ксеноновых ИК-источников с двумя сапфировыми оболочками. При этом теоретически выявлены факторы, определяющие параметры излучения газоразрядной лампы, сформирована математическая модель и выполнен расчет температурных, плазменных и радиационных характеристик разряда, а также выполнен комплекс экспериментальных, конструкторских и технологических исследований. Полученные результаты расчетных и экспериментальных исследований позволили впервые создать новое поколение отечественных импульсных газоразрядных источников ИК-излучения с разрядом смеси паров цезия, ртути и ксенона, ограниченным системой из двух сапфировых оболочек.

Ключевые слова: плазма, разряд, сапфир, оболочка, цезий, ртуть, ксенон, коэффициент поглощения плазмы, математическая модель, электрическая мощность, пиковая сила, постоянная составляющая ИК-излучения, глубина модуляции.

Введение

Источники инфракрасного (ИК) излучения в составе оптико-электронных систем широко используются в науке, медицине, гражданской и военной промышленности. Например, в настоящее время для защиты летательных аппаратов (ЛА) от переносных зенитных ракетных комплексов остро стоит задача разработки надежных источников ИК-излучения систем оптико-электронного противодействия (СОЭП) головкам самонаведения (ГСН) управляемых ракет (УР).

Наиболее эффективными на сегодняшний день принято считать импульсные (модулируемые) газоразрядные лампы. Импульсно-периодическая модуляция разрядного тока в лампе позволяет создать любую структуру выходящего потока излучения [1]. При этом импульсный источник ИК-излучения должен удовлетворять всем требованиям, предъявляемым к изделиям специального назначения:

1. Максимальная мощность излучения в спектральном диапазоне, определяемом функциональным назначением СОЭП, а именно, вплоть до 6,0 мкм;

2. Высокая надежность лампы при регулируемой потребляемой электрической мощности в диапазоне от 0,2 до 4,0 кВт;

3. Стойкость к механико-климатическим воздействиям в рамках требований, предъявляемым к изделиям, размещенным на борту летательного аппарата.

Очевидно, что рассматриваемые источники излучения являются весьма сложными изделиями электронной техники с широкой номенклатурой нелинейных теплофизических процессов, определяющих их функциональные параметры, и с трудно прогнозируемой 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, причем с максимальным привлечением экспериментальных методов и средств математического эксперимента. Все вышесказанное **делает актуальной задачу** полной конструкторско-технологической проработки ИК-источников на базе расчетно-теоретического и экспериментального исследования физики процессов в элементах газоразрядной лампы.

Гавриш Сергей Викторович, нач. научно-производственного комплекса, к.т.н.

Логинов Владимир Владимирович, нач. цеха.

Пучнина Светлана Викторовна, нач. лаборатории.

АО «Специальное конструкторское бюро «ЗЕНИТ»

(АО «СКБ «ЗЕНИТ»).

Россия, 124489, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., 10.

Тел./факс: 8(495) 983-01-94.

E-mail: svgavr@list.ru; stronzo@bk.ru;

svetlanapuchnina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18 июня 2018 г.

© Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В., 2018

Предпосылки создания импульсного газоразрядного источника ИК-излучения

Для того чтобы разработать модулируемый источник инфракрасного излучения необходимо определить:

- плазмообразующую среду, которая будет наиболее эффективно излучать в требуемом спектральном диапазоне (совпадающим со спектральным диапазоном излучения двигателя летательного аппарата и ИК ГСН);
- материал оболочки источника излучения, способный длительно удерживать излучающий газовый разряд;
- материал электродов такого источника излучения и способы герметизации его вместе с материалом оболочки;
- способы и методы высокочастотного управления требуемыми параметрами разряда;
- конструкцию источника ИК-излучения и технологию его изготовления.

Основным способом варьирования спектрального состава излучения интенсивного газового разряда является введение в разряд различных спектрально-излучающих добавок. Из литературных источников [2, 3] известно, что непрерывный спектр излучения в среднем ИК-диапазоне определяется возбуждением электронов на нейтральных атомах или ионах, т. е. чем больше электронов, тем интенсивнее ИК-излучение. Наиболее легко электрон отдает цезий, имеющий более низкий потенциал ионизации (3,89 эВ) в сравнении с ртутью (10,39 эВ) или ксеноном (12,13 эВ) [3]. Кроме этого, в отличие от остальных щелочных металлов, цезий имеет две очень интенсивные спектральные линии с длиной волны 3,6 и 3,02 мкм. Поэтому выбор цезия в качестве основного элемента плазмообразующей среды понятен. Ртуть в газоразрядных лампах используется для снижения теплопроводности смеси и обеспечения градиента потенциала плазменного канала, а ксенон – для зажигания разряда [3]. В итоге, окончательный состав плазмообразующей среды представляет собой парогазовую смесь цезия, ртути и ксенона.

Область оптической прозрачности монокристаллической окиси алюминия (сапфира, корунда) распространяется от 0,2 до 6,0 мкм [4]. Кроме этого, этот материал устойчив к агрессивному воздействию паров щелочных металлов при рабочих

температурах разряда. Поэтому разрабатываемый источник должен иметь оболочку из сапфира.

Создавать любую последовательность импульсов можно посредством приложения к разрядному промежутку лампы в определенной последовательности импульсов напряжения [2].

Косвенной предпосылкой правильности сделанных выше предположений является ограниченная информация из зарубежных научно-технических источников. В них ИК-источник представляет собой разрядную трубку из монокристаллического сапфира, наполненную парами цезия и расположенную в наружной термостатирующей сапфировой оболочке, которая заполнена газом-теплоносителем. Данная конструкция лампы обеспечивает высокие удельные электрические нагрузки за счет теплосъема потоком воздуха, направленным на наружную оболочку. Среди характеристик ИК-излучателей важными являются две: пиковая сила излучения A и глубина модуляции m в заданном интервале спектра (при фиксированной длительности импульса $t_{0,5}$). Глубина модуляции излучения представляет собой отношение переменной (модулируемой) составляющей излучения к суммарному излучению ИК-источника, включающему помимо модулируемой и постоянную составляющую излучения оболочек A_n .

Сложность создания импульсного газоразрядного ИК-источника заключается в том, что перечисленные выходные параметры лампы взаимосвязаны между собой. Так, повышение пиковой силы излучения возможно за счет увеличения напряжения на лампе при уменьшении времени его приложения к электродам. Таким образом, максимальное значение импульса излучения возрастает, но при этом длительность $t_{0,5}$ уменьшается. Поэтому поиск компромисса между значениями A , m и $t_{0,5}$ является важной исследовательской задачей, направленной на достижение требуемых эксплуатационных характеристик газоразрядной лампы и СОЭП в целом.

Обзор современного состояния физики разряда в парах щелочных металлов

Учитывая, что поставленная задача является новой, то на первом этапе разработки необходимо провести научно-технический анализ передового научного опыта в области исследования разряда в парах щелочных металлов.

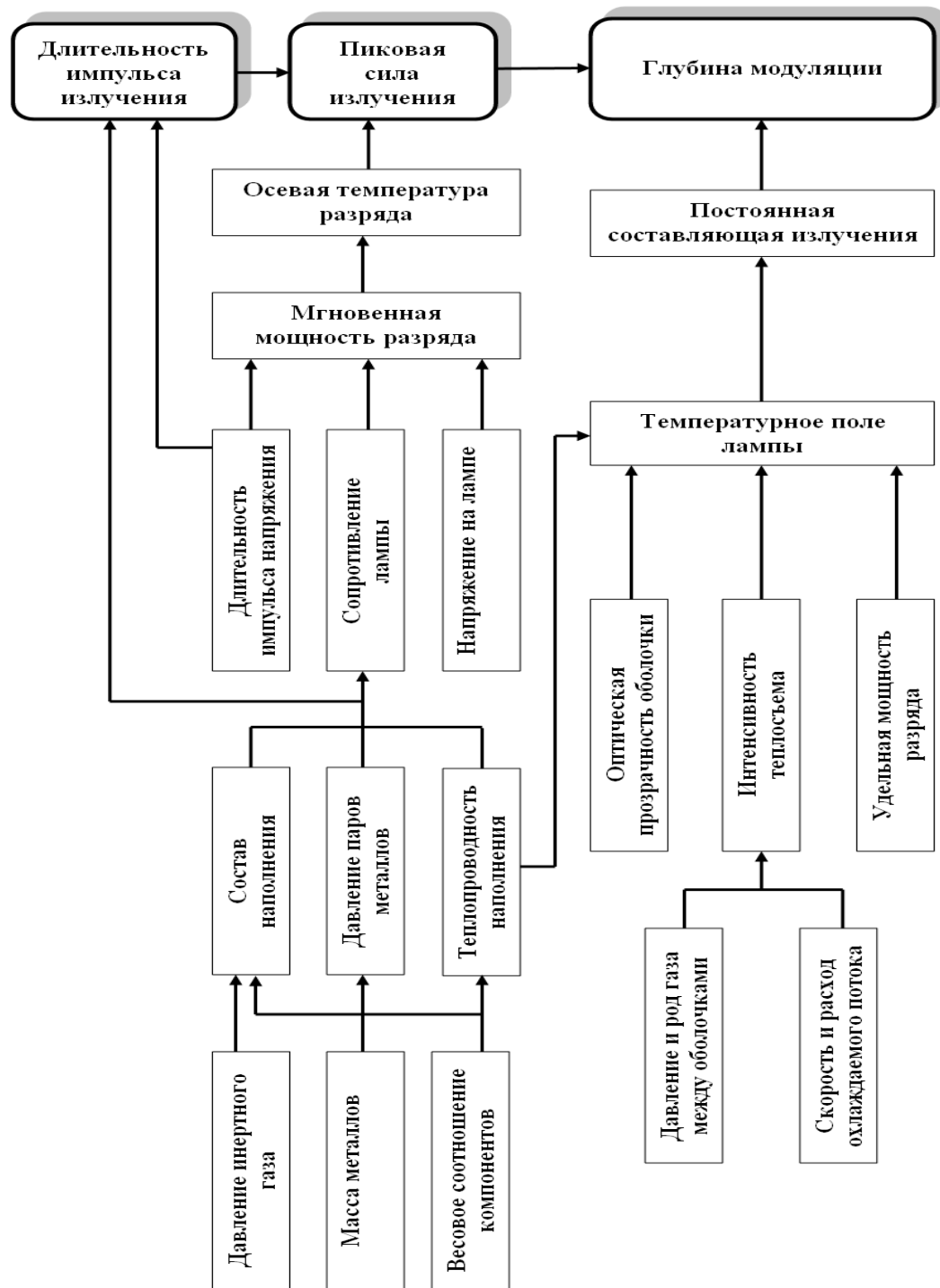


Рис. 1. Факторы, определяющие основные параметры излучения импульсного газоразрядного источника ИК-излучения для СОЭП.

На основе проведенного обзора физических процессов, происходящих в натриевом разряде и излучательной плазме других щелочных металлов, применительно к импульсным газоразрядным источникам для СОЭП можно сделать следующие выводы (см. рис. 1).

1. Из исследований Д. Уорби [5] следует, что фактором, определяющим энергетический баланс и, в частности, пиковую силу излучения, является осевая температура разряда T_0 . Причем увеличе-

ние T_0 приводит к снижению интенсивности излучения в спектральных линиях натриевого разряда, расположенных в ИК-области, но при этом наблюдается прирост КПД излучения ИК-континуума до 6 % при достижении осевой температуры плазмы 4140 К. Важную роль в данном механизме играет ртуть, вводимая в состав наполнения лампы. Обладая низкой теплопроводностью, она уменьшает удельные потери в плазменном столбе и, тем самым, повышает осевую темпера-

туру разряда и снижает температуру оболочки лампы. В совокупности эти эффекты приведут к повышению пиковой силы излучения и модуляционных характеристик газоразрядного источника ИК-излучения.

2. Добавление ртути к щелочным металлам способствует образованию амальгамы в лампе, что, в соответствии с законом Ф. М. Рауля, приведет к падению давления каждого компонента над образовавшимся соединением. В итоге излучательные характеристики разрядного источника приобретают многофакторную зависимость от температуры холодной точки лампы $T_{хт}$, массы амальгамы, весового соотношения компонентов в ней и т. д. (см. научные работы Д. Уорби, Ц. Хироямы, Б. Джонса, Г. Н. Рохлина, Е. Б. Волковой и т. д.). Рассмотренные явления имеют большое значение при создании источника ИК-излучения. Увеличение давления паров щелочного металла обеспечит рост интенсивности континуума в ИК-области. Одновременно за счет увеличения теплопроводности плазмообразующей среды происходит повышение температуры разрядной оболочки и снижение глубины модуляции излучения.

3. Аналогичные последствия будут наблюдаться при попытке использовать многокомпонентные сплавы щелочных металлов со ртутью (амальгаму). Из диссертационных работ советских ученых Н. П. Петренко, М. Б. Дергачевой, Е. Н. Гайдукова, И. В. Колпаковой следует, что спектр излучения лампы определяет элемент наполнения, имеющий наименьший потенциал ионизации. При этом теплопроводность плазмообразующей среды изменяется в зависимости от теплофизических свойств вводимого в разряд элемента. Поэтому в данной работе была поставлена задача оптимизации состава наполнения лампы.

4. Для повышения давления паров излучающего металла разработчиками применяются методы подогрева холодной точки $T_{хт}$ газоразрядных ламп. В натриевых лампах высокого давления и лампах накачки твердотельных лазеров регулирование $T_{хт}$ реализовано двумя способами. В работах Г. Н. Рохлина, Е. Б. Волковой [3] изменение температурного поля разрядной трубки лампы осуществлялось увеличением удельной электрической мощности натриевого разряда. Примененный для этих целей И. В. Колпаковой и Е. Н. Гайдуковым подогрев катодного узла ламп специальным нагревателем не пригоден для практической реализации в лампе с двумя оболочками в силу ее конструктивных особенностей.

5. П. Д. Джонсон и Т. Х. Раутенберг [6] в своих исследованиях впервые для повышения осевой температуры натриевого разряда применили импульсный режим электрического питания ламп. В результате эксперимента рассчитанная по методу М. Ф. Бартельса осевая температура составила 5500 К при пиковом токе 25 А. При этом авторы впервые наблюдали стягивание (контрагирование) разряда к оптической оси, приводящее к появлению в спектре натриевого разряда дополнительных линий высоковозбужденных уровней в синезеленой области. Д. Т. Дакин и Т. Х. Раутенберг [7] выяснили механизм релаксации плазмы после завершения импульса напряжения: при высокой температуре доминируют энергетические потери излучением, а по мере остывания преобладающим механизмом потерь становится теплопроводность. Поэтому для обеспечения модуляционных характеристик ИК-источника излучения необходимо организовать усиленный теплообмен с поверхности разрядной трубки.

6. Впервые предложенный в работах К. Гюнтера [8] режим горения слаботокового разрядного канала (режим «дежурной дуги») между силовыми импульсами тока натриевого разряда позволяет получить импульсно-периодическую структуру излучения любой сложности.

Математическое моделирование импульсного цезий–ртуть–ксенонового разряда

Отсутствие информации по условиям эксплуатации, особенностям конструкции ламп и многообразию геометрических, энергетических и физических параметров, определяющих излучательные характеристики разрабатываемого источника, потребовали проведения серьезных расчетных и исследовательских работ. Для сужения области поиска оптимальной конструкции лампы в работе была разработана математическая модель цезий–ртуть–ксенонового разряда, ограниченного системой сапфировых оболочек, позволяющая расчетным путем получить прогнозируемые параметры и выделить основные направления экспериментальных исследований. Математический аппарат, алгоритм реализации модели, сформированные базы данных по материальным и оптическим характеристикам цезий–ртуть–ксеноновой плазмы и ограничивающих ее сапфировым оболочкам подробно представлены в работах [9, 10]. В данной публикации выделены только важные особенности методики разработанного масштабного вычислительного эксперимента (см. рис. 2).

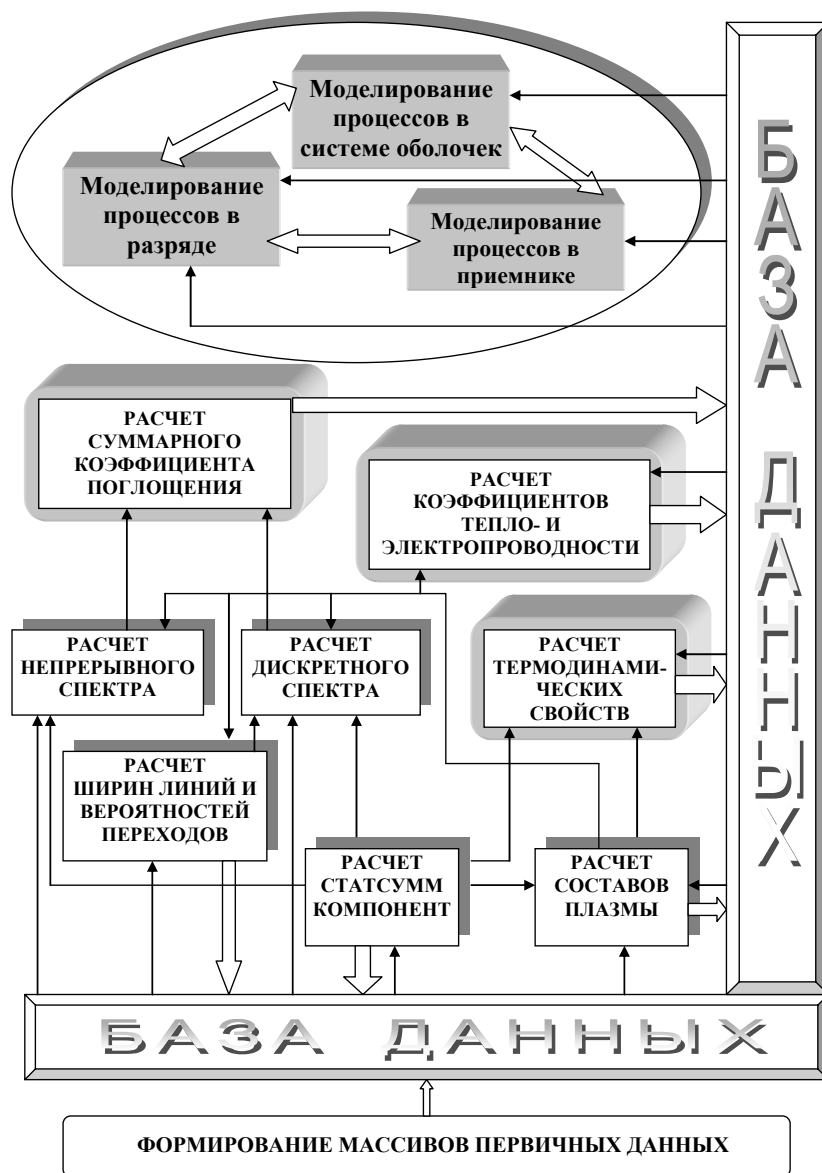


Рис. 2. Схема полного цикла математического моделирования импульсно-периодического разряда, ограниченного системой двух сапфировых оболочек.

Отличительной особенностью разработанной модели от существующих способов расчета плазменных процессов является учет сложных явлений, происходящих в импульсной лампе:

- работа рассматривается в импульсно-периодическом режиме, т. е. в условиях циклического нагрева и остывания плазмы как во время каждого импульса, так и в начале и окончании серии импульсов;
- наличие дежурной дуги обеспечивает поддержание плазменного канала в промежутке между импульсами и сериями импульсов;
- моделируется трехкомпонентный состав плазмы, что в зависимости от температуры и давления паров вносит изменения в теплопроводность, электропроводность и излучение плазмы;

- наличие системы двух излучающе-поглощающих сапфировых оболочек оказывают влияние на теплофизическое состояние плазмы;
- оптимизируются импульсные характеристики излучения в среднем ИК-диапазоне, что ранее никто не делал.

При формировании математической модели необходимо отметить несколько важных положений.

1. В результате проведенного в работе научно-технического анализа для рассматриваемого типа разрядов характерны диапазоны температур $(3-10) \times 10^3$ К и давлений 0,01–0,5 МПа. Для указанных режимов нами установлено, что наличие неравновесной пристеночной зоны (порядка 0,2–0,4 от внутреннего радиуса R разрядной трубки) не сказывается существенным образом на результа-

тах расчетов, выполненных без учета неравновесности.

2. Времена установления кинетического равновесия между электронами и нейтральными частицами, между электронами и ионами, а также время установления максвелловского распределения по уровням для мощных импульсных разрядов в центральных областях составляют при $T \approx 10^4$ К и $n_e \approx 10^{18}$ см⁻³ соответственно 10^{-6} , 10^{-7} и 10^{-7} с.

3. Рассматриваемая в работе плазма относится к слабонеидеальной. С учетом дальнедействующего характера кулоновского потенциала и экранировки зарядов для оценок неидеальности плазмы обычно принимается параметр неидеальности [11] $\Gamma = \frac{e^2}{kT \times r_D}$, где e , k , T , r_D – заряд электрона, постоянная Больцмана, температура плазмы и дебаевский радиус экранирования. Значение параметра неидеальности для изучаемой плазмы не превышает в среднем 0,1–0,25. Повышенные значения параметра свойственны плазме щелочных металлов при увеличении давления.

Всё это позволило построить математическую модель разряда для достаточно длинных цилиндрических разрядных промежутков в приближении локального термодинамического равновесия, которая включает уравнения сохранения энергии, неразрывности, переноса излучения в плазме, сохранения массы в замкнутом объеме, закона Ома, уравнения внешней электрической цепи [9, 10]. Сложность конструкции разрабатываемого ИК-источника поставила задачу учета влияния излучения разогретых оболочек на состояние цезиевой плазмы, поэтому математическая модель дополнена уравнениями энергии (теплопроводности) для двух оболочек с зазором между ними, заполненным газом. При этом спектральный поток излуче-

ния в оболочках в области полупрозрачности сапфира рассчитывается в приближении Шустера–Шварцшильда для цилиндрического слоя [10]. Решение сформулированной системы дифференциальных уравнений осуществляется методом конечных разностей с применением итерационной процедуры, состоящей из множества вложенных циклов. Для обеспечения работы модели разряда необходимо располагать следующими теплофизическими свойствами плазмообразующей среды: коэффициентами электро- и теплопроводности, теплоемкости, плотности плазмы и т. д. Некоторые данные брались из экспериментальных и теоретических работ различных авторов, другие рассчитывались в работах [9, 10].

Масштабный вычислительный эксперимент, в ходе которого было исследовано влияние большого числа геометрических, энергетических и физических параметров ИК-излучателей на их выходные характеристики (см. рис. 1), позволяет сделать заключения о зависимости пиковой мощности излучения в заданных областях спектра и глубины модуляции излучения от набора ключевых факторов, например, состава наполнения. Так, увеличение содержания цезия в разряде в пределах от 0,53 до 5,3 мг приводит к изменению пиковой силы излучения примерно на 25–30 %. Максимальное расчетное значение A при этом достигает 70 Вт/ср для спектрального диапазона 3–5 мкм и 120 Вт/ср для интервала длин волн 2–4 мкм при средней электрической мощности $P_{ср} = 2$ кВт.

В ходе вычислительного эксперимента выявлено, что при конструировании импульсного источника ИК-излучения наблюдается сложность в получении компромисса между основными тремя параметрами модулированного излучения A , m , и $t_{0,5}$. На рис. 3–5 представлены некоторые результаты расчетных исследований, поясняющие этот вывод.

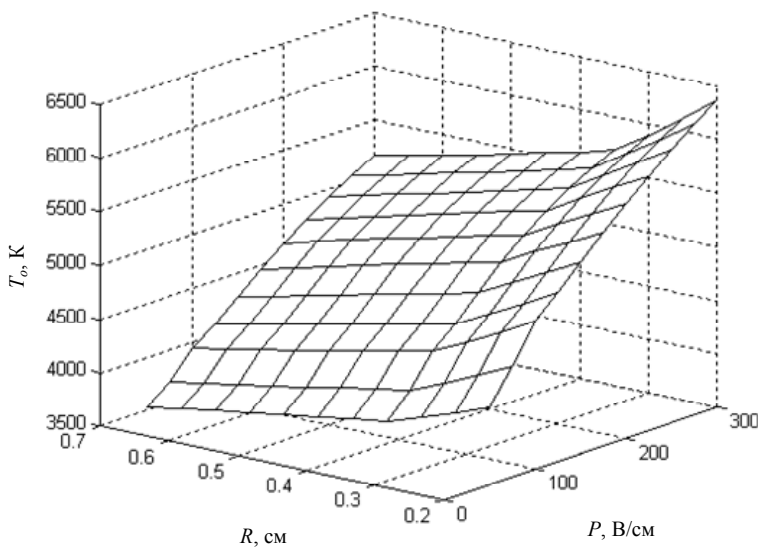


Рис. 3. Зависимость осевой температуры плазмообразующей среды от средней электрической мощности и радиуса разрядной трубки при отношении компонент Cs:Hg:Xe – 5:1:1,5

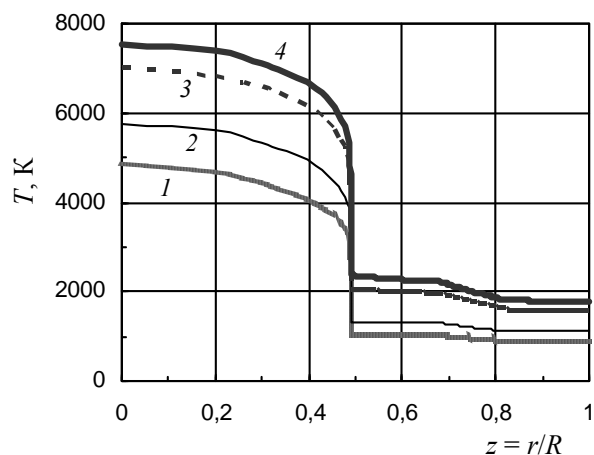


Рис. 4. Температурное распределение в Cs–Hg–Xe разряде, ограниченном системой двух сапфировых оболочек. Давление в разряде $p = 0,5$ МПа, $R = 0,35$ см, соотношения компонент Cs:Hg и Cs:Xe – 1 и 1,5. 1 – электрическая мощность $P = 155$ Вт/см, 2 – 320, 3 – 800, 4 – 1100. Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности лампы – $0,001$ Вт/см² К, толщины внутренней оболочки, зазора и внешней оболочки – 0,13, 0,1 и 0,13 см, соответственно. Длительность токового импульса – 120 мкс, частота – 500 Гц.

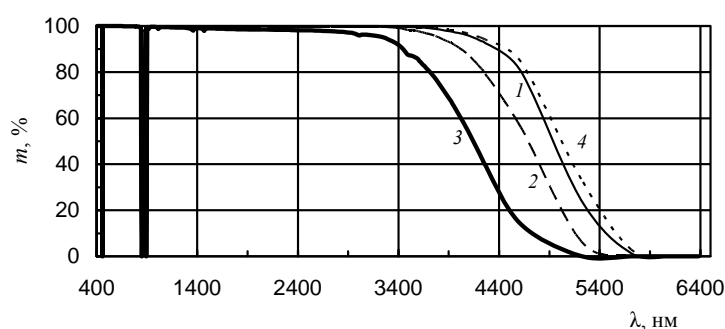


Рис. 5. Спектральная зависимость глубины модуляции излучения m . Параметры разряда приведены в подписи к рис. 4. Коэффициент теплоотдачи – 1, 2, 3 – $0,001$ Вт/см², 4 – $0,01$. 1 – электрическая мощность $P = 155$ Вт/см, 2, 4 – 320, 3 – 800.

Для увеличения осевой температуры разряда и, соответственно, пиковой силы излучения необходимо повышать электрическую мощность и уменьшать радиус плазменного канала (см. рис. 3). Такие меры неизбежно приведут к снижению глубины модуляции. На рис. 4 представлено радиальное распределение температуры в плазме и системе двух поглощающе-излучающих оболочек при различных удельных электрических мощностях $P_{уд}$. Видно, 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 [9, 10], одновременно происходит сдвиг максимума функции распределения Планка для нагретых оболочек с 3 до 1,3 мкм [12], что приводит к увеличению постоянной составляющей импульса излучения A_n и, соответственно, к снижению глубины модуляции (рис. 5). Поэтому для снижения A_n , т. е. при поиске компромисса между глубиной модуляции и пиковой силой излучения необходимо оптимизировать условия охлаждения, соотношения компонент наполнения, а также коэффициент пропускания материала. Приведенные расчетные данные удов-

летворительно описывают полученный нами в дальнейшем экспериментальный материал.

Экспериментальные исследования импульсного цезий–ртуть–ксенонового разряда

В наших экспериментальных исследованиях изучены три группы факторов (конструктивные параметры, режимы электрического питания и условия эксплуатации), определяющие спектрально–энергетические и модуляционные характеристики газоразрядного источника ИК-излучения.

Конструктивные особенности ламп

В эту категорию параметров входят размеры разрядного канала и сапфировой оболочки (толщина стенки, конфигурация и т. д.), наполнение разрядной трубки (состав, масса и весовые соотношения компонентов), габариты внешней оболочки, давление и род газа – теплоносителя между оболочками и т. д. (см. рис. 6).

Изучение спектрального распределения излучения импульсных разрядов в парах натрия, калия, рубидия и цезия в двух спектральных диапазонах 0,8–3,0 мкм и 2,4–5,0 мкм, совмещенное с калориметрическими измерениями мощности излучения, подтвердило преимущество цезиевого разряда (см. таблицу).

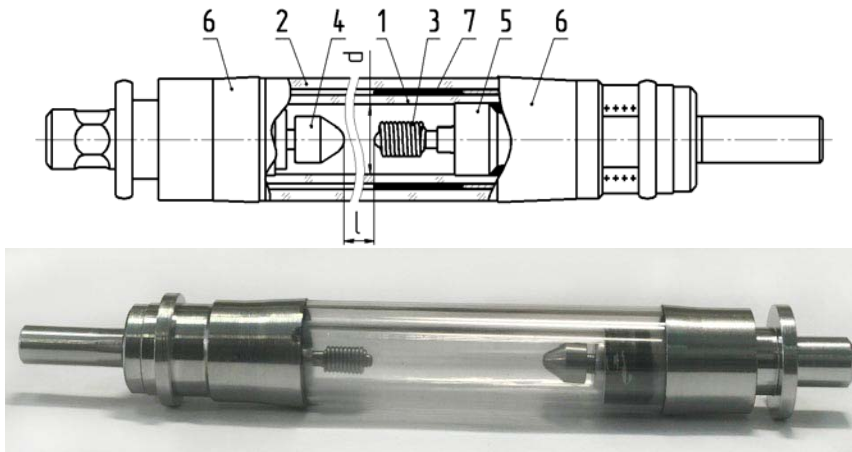


Рис. 6. Конструкция импульсного источника ИК-излучения на основе разряда в смеси цезий – ртуть – ксенон с двумя сапфировыми оболочками: 1 – сапфировая разрядная трубка, 2 – сапфировый внешний баллон, 3 – катод, 4 – анод, 5 – ниобиевый колпачок, 6 – коваровые тоководы, 7 – утепляющий экран, d и l – диаметр и длина разрядного канала.

Таблица

Сравнение разных разрядов

Плазмообразующая среда	Натрий	Калий	Рубидий	Цезий
Средняя мощность излучения, Вт	220	180	172	160
	14	18	16	23

При введении небольших добавок калия и рубидия (1 мг) в цезиевый разряд наблюдалось появление в спектре дополнительных тонких линий, мощность излучения которых не оказывает существенного влияния на величину пиковой силы (см. рис. 7), но приводит к падению m за счет увеличения теплопроводности плазмы. С другой стороны, как и предполагалось, введение ртути в разряд при удельных электрических нагрузках

430 Вт/см за счет повышения осевой температуры и снижения теплопроводности плазмы позволяет получить $A = 65$ Вт/ср при глубине модуляции 97 %. Как показано выше, рост давления паров цезия p_{Cs} над амальгамой приводит к повышению энергетического выхода ИК-излучения из разряда. Подтверждение этому факту получено экспериментально путем увеличения p_{Cs} при «подогреве» самой холодной точки лампы $T_{хт}$ (см. рис. 8).

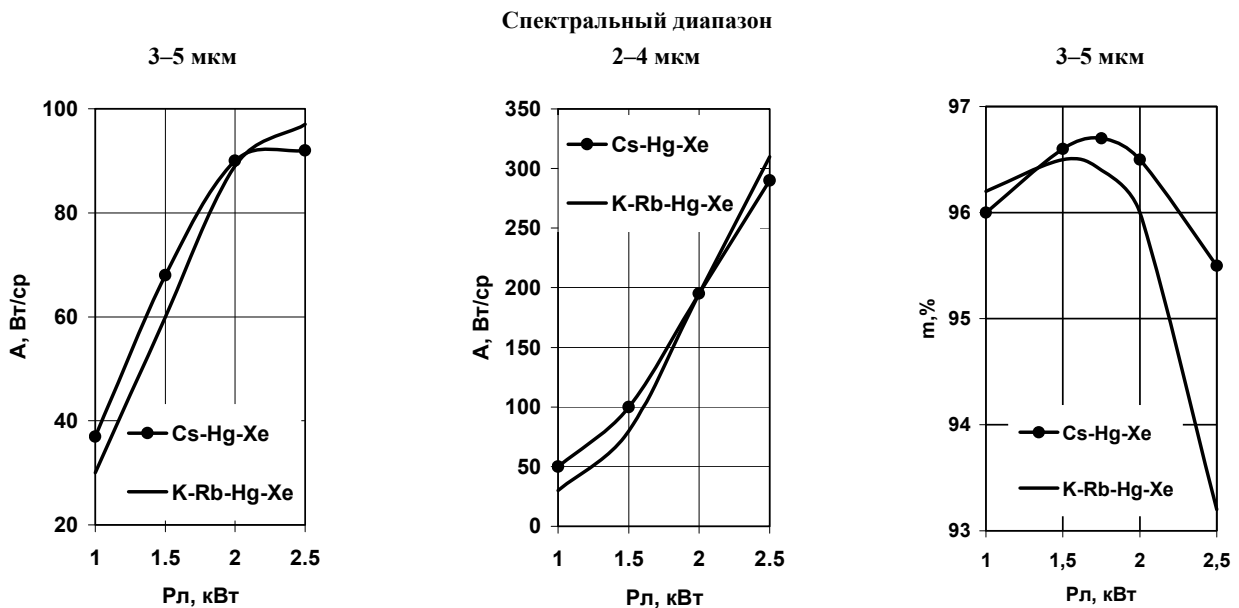


Рис. 7. Зависимость пиковой силы A и глубины модуляции m излучения от электрической мощности ламп с различным наполнением.

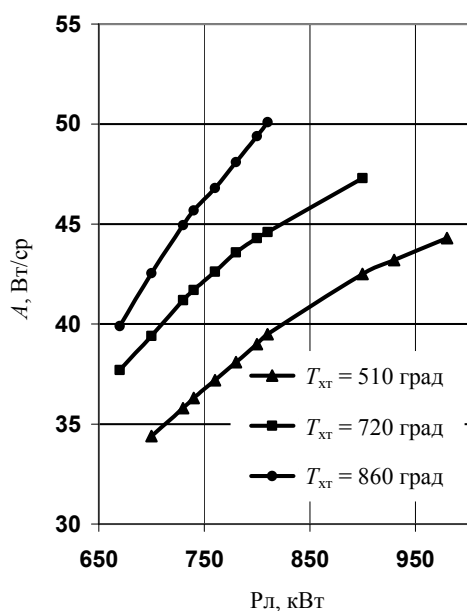


Рис. 8. Зависимость пиковой силы излучения от электрической мощности лампы для различных температур холодной точки.

Учитывая сложную зависимость параметров газоразрядной лампы от состава наполнения, нами решена задача, имеющая практическую значимость. Для обеспечения технологической стабильности характеристик газоразрядной лампы при изготовлении нами разработана математическая модель расчета требуемых давлений компонентов над амальгамой. Система уравнений позволяет рассчитывать состав наполнения при варьировании конструктивных параметров лампы. Подробно математическая модель и расчетные зависимости давления паров цезия от массы амальгамы, температуры холодной точки лампы, радиуса разрядного канала рассмотрены в работе [13].

Увеличение диаметра разрядного канала дает прирост пиковой силы излучения в ИК-диапазоне и повышает глубину модуляции (см. рис. работы [14]). При этом наблюдается качественное совпадение рассчитанных по математической модели [10] и экспериментальных данных [14].

Согласно результатам математического моделирования, в лампе с двумя сапфировыми оболочками основные потери тепла приходятся на газонаполненный зазор между ними. Поэтому выбор газа теплоносителя имеет особое значение. Во-первых, химические свойства наполнителя должны исключать взаимодействие с элементами внутренней арматуры лампы, а во-вторых, необходимо, чтобы используемые газы имели высокую теплопроводность, диэлектрические свойства и низкую проницаемость сквозь материалы конструкции разрядной трубки и внешней колбы. По результатам экспериментального изучения параметров ламп, наполненных различными

газами (гелий, азот, аргон, и т. д.), в качестве газа-теплоносителя выбран неон при давлении 700 мм рт. ст. Нами установлено, что давление газа между оболочками не влияет на температурное состояние лампы, но выбор его величины позволяет исключить пробой неона в момент повторного зажигания «горячей» лампы при высоком сопротивлении разрядной трубки.

Параметры электрического питания газоразрядной лампы

В наших экспериментах изучены два способа электрического питания газоразрядных ламп с цезий-ртуть-ксеноновым наполнением. Это работа импульсного источника ИК-излучения в разрядном контуре с тиристорным модулятором и при электрическом питании от мощного выпрямителя с транзисторным коммутатором.

В работе [15] нами подробно изучено влияние на характеристики ИК-излучения газоразрядной лампы условий электрического питания, определяемых параметрами разрядного контура: величинами емкости C и индуктивности L . В экспериментах выявлено, 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 глубины модуляции. По этой причине наиболее высокую стабильность комплекса выходных параметров обеспечивает согласованный контур, а именно, $C = 40$ мкФ, $L = 50$ мкГн. Однако достичь высоких показателей пиковой силы излучения (более 50 Вт/ср при $P_{л} = 1,5$ кВт) и глубины модуляции (92 %) при таком способе электрического питания не удалось. Такой результат обусловлен зависимостью указанных характеристик от переходных процессов в элементах разрядного контура.

В наших исследованиях выявлено, что наиболее эффективным схемным решением электрического питания лампы является способ подачи и прерывания транзисторным ключом прикладываемого к лампе напряжения от мощного выпрямителя [15]. При этом формируется крутой задний фронт токового импульса, зависящий только от скорости остывания плазмы (от состава наполнения, охлаждения лампы и т. д.), а не от переходных процессов в коммутирующем элементе.

При научных исследованиях такое схемное решение обеспечивает формирование прямоугольных импульсов подаваемого на лампу

напряжения, что дает возможность изучать не только ионизационные и релаксационные процессы на фронтах импульса, но и квазистационарную плазму на «плато» импульса.

В полученных спектрах излучения импульсного цезий–ртуть–ксенонового разряда наблюдается идентичность линий для различных моментов времени, и только по мере приближения импульса тока к своему максимальному значению возрастает их интенсивность, а несколько линий самообращаются. Проведенная оптимизация времени открытия ключа t_k и напряжения U , прикладываемого к лампе, показала, что начиная с $t_k = 260$ мкс при напряжении $U = 120$ – 130 В величина пиковой силы стабилизируется и достигает значений 70 Вт/ср.

В экспериментах нами выявлено, что длительность импульса излучения $t_{0,5}$ линий и непрерывного фона разнятся в зависимости от типа излучающего атома. Например, $t_{0,5}$ ртутной линии для $\lambda = 313,156$ нм составляет около 350 мкс, а для цезия при $\lambda = 697,32$ нм она достигает 550 мкс. Этот результат показывает, что для формирования модулированной оптической помехи ГСН атакующей УР необходимо регулировать длительность импульса напряжения на лампе в зависимости от спектральной чувствительности приемника ГСН.

Условия эксплуатации газоразрядной лампы

Для изделий специального применения важным требованием является готовность системы к выполнению функции противодействия и постоянная работоспособность источника ИК-излучения в условиях различных температурных и атмосферных воздействий. Поэтому актуальной задачей является обеспечение надежного зажигания, минимального времени готовности, поддержание стабильности излучательных характеристик газоразрядной лампы и т. д.

В разделе статьи, посвященном выбору газотеплоносителя, уже отмечалась важность вопроса зажигания лампы. Обеспечение гарантированного зажигания цезиевых ламп с двумя сапфировыми оболочками имеет определенную трудность. После отключения тока на внутренней поверхности разрядной трубки образуется проводящая пленка щелочного металла, соединяющая электроды и исключающая повторный пробой лампы высоковольтным импульсом поджига.

На рис. 9 приведена зависимость сопротивления лампы от времени остывания после выключения лампы при естественном остывании и при охлаждении тремя вентиляторами через конфузур.

билизирована до величины 250 кОм примерно через 1,5 мин., а при естественном охлаждении только через 10 мин. достигается значение 1 МОм. Характер кривой 1, а именно участок АВС, нами объясняется влиянием внешней оболочки на температуру разрядной трубки. В момент отключения лампы (точка А) температура внешней колбы соответствует рабочей температуре, и на участке АВ продолжается охлаждение горелки (конденсация паров цезия) за счет градиента температур в зазоре. Точка В соответствует равенству температур внешней оболочки и поверхности горелки. С этого момента внешняя колба играет роль термостата, температура пара и оболочки выравниваются, а участок ВС соответствует испарению частично сформированной пленки и уходу паров в холодную зону. При этом сопротивление лампы возрастает за счет исчезновения «шунтирующего» эффекта. Точка С соответствует окончанию частичного испарения пленки и продолжению конденсации пара цезия в холодную зону. Этот факт подтверждает необходимость сохранения принудительного охлаждения лампы после отключения.

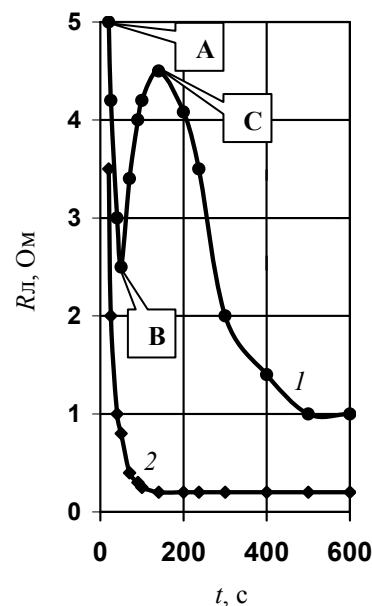


Рис. 9. Зависимость сопротивления лампы от времени остывания после выключения лампы при естественном остывании (1) и охлаждении тремя вентиляторами через конфузур (2).

С другой стороны, в нерабочем состоянии величина сопротивления лампы может находиться в интервале от 0,2 до 60 кОм, что связано с неравномерностью толщины пленки щелочного металла, определяемой качеством внутренней поверхности (волнистостью) горелки, температурными условиями хранения и т. д.

Для зажигания таких ламп нами предложен способ, основанный на том, что через образовав-

шуюся 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 надежного 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);
- $U_{\text{пик}} = 8\text{--}10$ кВ, $t_{0,5} = 0,25$ мкс, $f = 10$ Гц (для $R_n > 150$ кОм).

Приведенный алгоритм подключения блоков зажигания позволяет в течение 30 секунд обеспечить пробой разрядного промежутка и поддержание плазменного канала дежурной дуги.

Время готовности лампы определяется моментом стабилизации ее спектральных и энергетических характеристик. В процессе выхода лампы в номинальный режим работы спектр излучения претерпевает значительные изменения (см. рис. 10). При $P_{\text{л}} = 600$ Вт в спектре излучения разряда наблюдается наличие множества оптически тонких линий как цезия, так и ртути (в синей области расположены около тринадцати линий излучения Hg и пяти линий Cs). По мере увеличения мощности разряда происходит трансформация спектрального распределения излучения лампы, и при достижении мощности $P_{\text{л}} = 2000$ Вт двенадцать линий Hg практически полностью исчезают, а пять линий Cs и одна линия Hg ($\lambda = 365,48$ нм) самообращаются. Визуальные наблюдения и регистрация излучательных характеристик лампы показали, что в течение 5 минут (время готовности лампы) после поджига при наращивании мощности со средней скоростью 6,5 Вт/с происходит стабилизация плазменного канала.

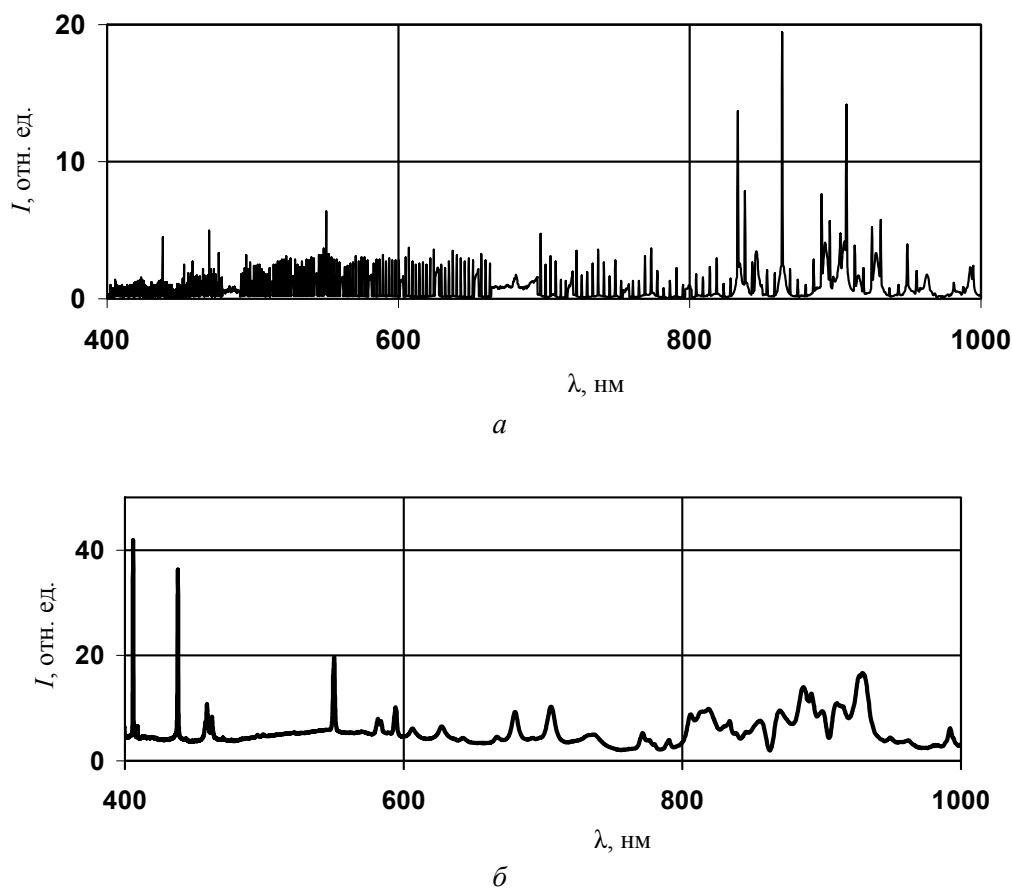


Рис. 10. Спектральное распределение излучения Cs-Hg-Xe лампы при $P_{\text{л}} = 600$ (а) и 2000 (б) Вт.

Надежность всей системы зависит от возможности импульсного газоразрядного источника обеспечивать требуемые параметры ИК-излучения независимо от температурных условий эксплуата-

ции. Нами выполнено расчетно-экспериментальное исследование влияния на параметры излучения газоразрядного источника изменения температуры окружающей среды в диапазоне от -60 °С до $+85$ °С.

На основе разработанной математической модели получено, что изменение температуры окружающей среды T_{oc} в пределах -60 °С до $+70$ °С не повлияет на режим работы лампы, так как изменение температуры холодной точки при этом составит лишь $20-30$ °С, что практически не отразится на величине давления добавок щелочного металла, определяющего параметры разряда.

Расчетным путем показано, что в сравнении с глубиной модуляции при комнатной температуре увеличение T_{oc} до $+70$ °С уменьшит величину Δm на $0,3$ %, а при $T_{oc} = -60$ °С произойдет рост m на $0,5$ %. Увеличение скорости охлаждающего потока воздуха способствует незначительному увеличению зависимости параметров излучения от температуры окружающей среды, например, при скорости потока 30 м/сек Δm составит меньше $0,7$ %. Выбранные условия охлаждения газоразрядной лампы с цезий-ртуть-ксеноновым наполнением позволили получить глубину модуляции 97 %.

Особенности конструирования и технологии газоразрядных ламп с сапфировой оболочкой

Конструкция ламп

Впервые при конструировании газоразрядных источников нами сделана попытка связать их эксплуатационные характеристики со структурным совершенством монокристаллической окиси алюминия и теплофизическими процессами, происходящими в стенке разрядной трубки лампы. Прежде всего, это возникновение термоупругих напряжений, обусловленных нагревом оболочки и дефектностью сапфира, приводящих в определенных условиях к разрушению лампы.

Оболочка, ограничивающая разряд, является остовом газоразрядной лампы и подвергается химическим, тепловым, механическим и радиационным воздействиям со стороны плазмы и окружающей среды. Учитывая особенности монокристаллической структуры и условия функционирования разрядных источников, нами в работе исследованы температурные поля сапфировых оболочек ламп при различных удельных электрических нагрузках, механизм дефектообразования, влияние структурного совершенства на прочностные свойства оболочки при комнатной и повышенных температурах, зависимость оптической прозрачности от температуры оболочки $T_{об}$ и дефектности монокристаллического сапфира.

Для оценки теплового поля сапфировых оболочек при эксплуатации лампы разработана методика исследования продольного распределения температуры разрядной трубки и внешней колбы [16]. За основу нами взят, предложенный

Ю. К. Лингартом и В. А. Петровым способ регистрации ИК-излучения в области коротковолновой границы первой колебательной полосы поглощения сапфира (k_{λ}). В этой области k_{λ} полупрозрачных материалов достигает значений 10^2-10^3 см⁻¹, а излучательная способность приближается к единице. Представленные в работе [16] результаты позволили выявить температурные границы эксплуатации конструктивных элементов лампы. Так в зоне соединения сапфира с электродом $T_{об}$ достигает 850 °С, а в центре разрядного канала стремится к 1100 °С.

Условия направленной кристаллизации по методу А. В. Степанова при росте сапфировых труб определяют ее свойства и дефектность структуры (блочность, точечные дефекты, парогазовые включения) [17]. Поэтому нами при изучении механизма выращивания кристаллов и в результате проведенных исследований установлены следующие важные обстоятельства.

1. Выращивание сапфировых труб с минимальным количеством инородных примесей и парогазовых включений должно выполняться при прецизионной стабилизации температуры и скорости выращивания, равной $0,5-1,0$ мм/мин при выращивании (в момент соприкосновения затравки с пленкой расплава) и $1,5-2,0$ мм/мин в процессе направленной кристаллизации.

2. При наличии затравочных кристаллов необходимого качества ($\rho \sim 5^\circ$, $2-3$ границы блоков с малой разориентацией) концы выращенных трубок на длине 800 мм по качеству не должны отличаться от затравок.

3. Для обеспечения фиксированных геометрических размеров выращиваемой трубы высота фронта кристаллизации должна составлять $0,2$ мм.

4. Для получения бесцветных труб, предпочтение следует отдать синтетическому сырью без примесей окислов титана. Наибольшую чистоту при подготовке шихты обеспечивает разработанный в [17] способ термодробления буль лейкосапфира, полученных методом Вернейля или ГНК.

Для выявления связи механической прочности оболочки лампы с блочностью сапфира нами предложен способ воздействия на внутреннюю поверхность сапфировой трубы посредством пластичной среды [17]. При исследовании зависимости разрушающего давления от количества блоков в стенке выявлено предельное значение прочности для безблочной сапфировой трубы, равное 900 МПа. В случае блочной структуры механизм разрушения образцов существенно зависит от количества блоков и угла ориентации межблочной границы.

Повышение рабочей температуры оболочки приводит к аномальной зависимости прочности сапфировых труб [12], обусловленной наложением процессов пластической деформации и разрушения, приводящим к минимуму прочности (усилие разрушения менее 100 МПа) при температуре 800 °С.

Используемые виды обработки сапфировых труб различным образом влияют на прочность корунда. При шлифовке и полировке возникают термоупругие напряжения на поверхности, связанные с формированием нарушенного слоя. Экспериментально нами установлено, что при нагреве до 1500–1600 °С может происходить рекристаллизация нарушенного слоя, которая способствует частичному снятию напряжений в приповерхностном слое. Повышение температуры до 1800–1900 °С улучшает структуру слоя, но не устраняет всех дефектов. Дальнейшее увеличение температуры до 2000–2200 °С может приводить к частичному испарению рекристаллизованной поверхности, при этом снижая оптическое пропускание сапфира. Поэтому нами установлено ограничение температуры отжига сапфира – не выше 1900 °С.

Оптическая прозрачность сапфира существенно зависит от дефектности структуры кристалла. Если неоднородности невелики по размерам (малы по сравнению с длиной волны $\sim 0,1\lambda$), то рассеяние излучения отсутствует, но если они сравнимы с длиной волны, то рассеяние излучения резко возрастает. Такими неоднородностями в профилированных кристаллах сапфира являются газовые и твердые включения, диаметром свыше 2 мкм. Для повышения оптического качества сапфировых труб нами предложено производить шлифовку и полировку труб для снятия приповерхностного дефектного слоя на глубину 0,25–0,2 мм с последующим высокотемпературным отжигом. Подробно свойства сапфировых труб для газоразрядных ламп изучены в работе [17].

В итоге наших исследований и анализа данных, полученных другими авторами, были сформулированы основные технические требования к лейкосапфировым трубам для оболочек ИК-источников с удельной электрической нагрузкой до 200 Вт/см²:

- труба не должна иметь трещин, посечек, цветных включений просматриваемых визуально; сколов более 0,5×0,5 мм на торцевых поверхностях трубы, волнистости на боковой поверхности;
- количество пузырей не более 10 шт. с размером 0,4 мм на трубке внешнего баллона и не более 5 шт. с диаметром 0,2 мм на длине разрядной трубки;
- конусность, овальность и разностенность труб не должны выходить за пределы допуска на

наружный (–0,3 мм) и внутренний диаметры (+0,25 мм);

- допуск прямолинейности на длине трубы в 150 мм не более 0,3 мм;
- количество блоков у трубки для горелки не более 5 с разориентацией 8°, а для ТМБК внешнего баллона не более 10 с разориентацией менее 10°;
- коэффициент пропускания в диапазоне 3,5–5,5 мкм не менее 0,8.

Технология изготовления ламп с сапфировой оболочкой

Надежность газоразрядных источников с сапфировой оболочкой определяется основными физико-химическими процессами, имеющими место при изготовлении ламп и в процессе их эксплуатации. Трудность в выполнении технологии сборки газоразрядных ламп связана с необходимостью получения герметичных соединений сапфира с металлическими элементами.

Конструирование тоководов осложняется высокой химической стойкостью и анизотропией тепловых свойств сапфира. Дополнительными требованиями к спаям в разрядной трубке являются устойчивость к агрессивному воздействию паров щелочных металлов и ртути, а к соединениям наружной оболочки это стойкость к внешним воздействиям (вибрация, одиночные удары, повышенная влажность, интервал рабочих температур от –60 °С до +85 °С, солевой туман и т. д.)

Перечисленным требованиям к гермоводам в разрядную горелку удовлетворяет разработанное соединение сапфира с ниобием посредством пайки стеклокерамическим цементом. При пайке и эксплуатации за счет теплового воздействия в соединяемых материалах происходят теплофизические процессы, приводящие к изменению свойств элементов спая, в частности, наблюдается рекристаллизация ниобия. В наших технологических исследованиях [18] 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 $T_{отж.} = 1600$ °С зерно укрупняется настолько, что становится соизмеримым с сечением образца [18]. В то же время вакуумный нагрев

лент сплава NbCu (0,8–1,4 вес. % Zr) при достижении температуры 1000 °С структурно не изменяется и только при $T_{\text{отж}} = 1800$ °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 CaO-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 °С происходит изменение фазового состава цемента. Проведенный нами рентгенофазный анализ цемента, спеченного при температурах 1500 и 1600 °С, показал присутствие в образцах алюминатов кальция типа CaO·Al₂O₃ и 12CaO·7Al₂O₃. Элементарный подсчет показывает, что относительная весовая концентрация кальция в алюминате типа 12CaO·7Al₂O₃ в 1,37 раза больше, чем в алюминате кальция типа CaO·Al₂O₃. Наблюдаемое увеличение концентрации кальция в спае приводит к повышению хрупкости спаи и росту напряжений в соединении. Поэтому в технологии изготовления токоввода недопустимо 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 спаи кальцием.

Сформированные выше требования к конструкции внешней оболочки сделали актуальной задачу изучения физико-химических процессов при металлизации поверхности сапфира и спаивании с токовводами [19]. В 60–70-е годы прошлого века Метелкиным И. И., Батыгиным В. Н., Пресновым В. А., Ерошевым В. К. и др. для металлизации использовались вольфрамо-иттриевые и молибдено-марганцевые пасты, наносимые вручную на поверхность сапфировой оболочки с последующим высокотемпературным вжиганием. Проведенные нами металлографические исследования [19] выявили следующие недостатки перечисленных покрытий: сложный состав пасты и высокие требования к дисперсионности применяемых порошков, наличие в пасте вредной для здоровья органической связки, ручной способ нанесения, исключаящий равномерность толщины металлизированной поверхности, многостадийность процесса вжигания.

Для обеспечения производительности и качества производства в работе разработан способ нанесения титановых покрытий магнетронным и вакуумно-дуговым напылением. В нашей работе

[19] подробно проанализированы механизмы высокотемпературного взаимодействия расплава медного припоя с титаном и титана с оксидом алюминия с образованием у поверхности сапфира интерметаллического соединения TiAl и даны рекомендации по температурно-временным режимам пайки токовводов.

Важное значение в производстве ламп имеет вопрос снижения трудоемкости изделия. Поэтому нами выполнены исследования по разработке групповой пайки ниобиевых узлов титановым и никель–титановым припоями (нитинол). Исследование интенсивности излучения рентгеновских спектральных линий, возбуждаемых под воздействием зондирующего электронного пучка, позволили изучить структуру переходных слоев в зоне спаи. В результате выбора технологических режимов пайки удалось получить идентичный механизм растворения ниобия в сплаве, так как количественный анализ состава образовавшегося основного расплава на границе ниобия с никелидом титана дал одинаковый результат: Ni – 39 %, Ti – 25 %, Nb – 36 %.

Перспективы дальнейшего развития импульсных газоразрядных источников ИК-излучения

Заложенные основы конструирования и функционирования нового поколения импульсных газоразрядных источников ИК-излучения для СОЭП позволяют выделить две новые области их применения:

1. Защита летательных аппаратов с высоким уровнем собственного теплового излучения, например, реактивных самолетов.

2. Замена устаревших станций активных помех ГСН всеракурсного противодействия на основе механически модулируемого излучения нагревательного элемента на СОЭП с импульсным газоразрядным источником ИК-излучения.

Импульсные источники ИК-излучения повышенной мощности

Для решения первой задачи необходимо получить пиковую силу излучения более 100 Вт/см² в спектральном диапазоне 3–5 мкм, следовательно, нужно повысить электрическую мощность на газоразрядной лампе до 4 кВт. Выполненный с использованием описанной выше математической модели расчет параметров цезий–ртуть–ксеноновой плазмы в диапазоне пиковых значений удельных электрических мощностей от 2,0 до 6,0 кВт/см³ показал, что при достижении диаметра плазменного канала 20 мм и $P_{\text{уд.}} = 2,5$ кВт/см³ воз-

можно достичь величины пиковой силы ИК-излучения порядка 85 Вт/ср. Для проверки полученного результата нами проведено макетирование и исследование импульсной цезий–ртуть–ксеноновой газоразрядной лампы с диаметром разрядной части 15 мм и межэлектродным расстоянием 50 мм (лампа 15/50). Полученная экспериментальная зависимость пиковой силы излучения от электрической мощности разряда показала, что $A = 130,5$ Вт/ср достигается при $P_{\text{л}} = 1,74$ кВт. В силу больших импульсных токов испытательное оборудование не обеспечило увеличение электрической нагрузки на лампе до требуемой мощности. Проведенный анализ полученной зависимости позволил сделать предварительное заключение о возможности достижения пиковой силы ИК-излучения 200 Вт/ср при электрической мощности 3,5 кВт и сроке службы газоразрядной лампы не менее 150 часов.

Импульсный цезиевый источник ИК-излучения с коаксиальным разрядом в сапфировой оболочке

Впервые в России получен коаксиальный разряд в парах цезий–ртуть–ксеноновой смеси. Исследования проводились с целью замены в существующих СОЭП низкоэффективных нагревательных элементов на импульсные газоразрядные лампы, обеспечивающие импульсно-периодическую структуру ИК-излучения в спектральном диапазоне до 6 мкм.

Предпосылка такого решения заключалась в следующем. Коэффициент оптического поглощения Cs-Hg-Xe плазмы k_{ν} в ближней ИК-области спектра достаточно высок, поэтому источником излучения в этом диапазоне спектра является относительно тонкий поверхностный слой плазмобразующей среды, и, соответственно, для повышения абсолютного выхода и КПД ИК-излучения требуется плазменный канал относительно небольшой толщины, но с большой площадью поверхности. Нами установлено, что, начиная с 1,1 кВт, излучение коаксиального разряда имеет большее значение пиковой силы (75 Вт/ср при удельной электрической мощности 430 Вт/см), чем в случае классического цилиндрического плазменного канала. Данная конструкция коаксиального разрядного источника подробно описана в работе [20], где также рассмотрены другие направления развития импульсных газоразрядных ламп с сапфировой оболочкой с преимущественным излучением в УФ-, видимом и ИК-диапазонах оптического спектра.

Заключение

В данной работе нами рассмотрены основные достижения в области конструирования импульс-

ных газоразрядных источников с сапфировой оболочкой. Предложенные расчетные данные, методики и экспериментальные результаты исследований цезий–ртуть–ксеноновой плазмы, ограниченной сапфировой оболочкой, свойства используемых материалов и конструкторско-технологические решения, полученные в ходе разработки импульсных газоразрядных источников ИК-излучения, могут послужить основой для создания других плазменных устройств на основе монокристаллической окиси алюминия.

Авторы выражают благодарность всем своим коллегам, совместно с которыми разрабатывались и реализовывались новые технические решения разрядных ламп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриш С. В., Гайдуков Е. Н., Константинов Б. А., Никифоров В. Г., Самодёргин В. А. // Светотехника. 1998. № 3. С. 22.
2. Маршак И. С., Дойников А. С., Жильцов В. П. и др. Импульсные источники света. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1978.
3. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. – М.: Наука, 1965.
5. Wharmby D. O. // Radiat. Processes Discharge Plasmas: NATO Adv. Study Inst. Pitlory. 1986. Vol. 5. P. 327.
6. Rautenberg T. H., Jonson P. D. // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. No. 6. P. 2270.
7. Dakin J. T., Rautenberg T. H. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. No. 1. P. 118.
8. Gunther K., Kloss H.-G., Lehmann T., Radtke R., Seirick F. // Contrib. Plasma Phys. 1990. Vol. 30. No. 6. P. 715.
9. Гавриш С. В., Градов В. М., Терентьев Ю. И. и др. // Светотехника. 2008. № 5. С. 12.
10. Градов В. М., Гавриш С. В., Рудаков И. В. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2017. № 6. С. 130.
11. Биберман Л. М., Воробьев В. С., Якубов И. Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 1982.
12. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 45.
13. Гавриш С. В. // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 6. С. 92.
14. Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Кугушев Д. Н. и др. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 85.
15. Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Логинов В. В. и др. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 53.
16. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. и др. // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2014. № 1. С. 49.
17. Браиловский В. Б., Гавриш С. В., Рыжков А. Е. // Контроль. Диагностика. 2007. № 2. С. 49.
18. Пучнина С. В. // Сварочное производство. 2015. № 9. С. 21.
19. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Сварочное производство. 2014. № 1. С. 31.
20. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 42.

Pulsed gas-discharge IR radiation sources for optical-electronic systems (a review)

S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina

Special Design Bureau "ZENIT", JSC
10 Panfilovskii av., Zelenograd, Moscow, 124489, Russia
E-mail: svgavr@list.ru; stronzo@bk.ru; svetlanapuchnina@mail.ru

Received June 18, 2018

Consideration is given to development of the pulsed Cs-Hg-Xe IR radiation sources with two sapphire shells. The factors those define discharge lamp irradiation parameters were theoretically revealed. The math model is created and calculations of temperature, plasma, radiation of discharge parameters are performed. In addition, complex of experimental constructive and technological researches is carried out. Obtained results of calculated and experimental researches allow first to create a new generation of the native pulsed gas-discharge IR radiation sources with discharge in vapors of cesium, mercury and xenon mixture, that bounded by two sapphire shells system.

Keywords: plasma, discharge, sapphire, shell, cesium, mercury, xenon, plasma absorption coefficient, math model, electric power, peak power, constant component, IR radiation, modulation depth.

REFERENCES

1. S. V. Gavrish, E. N. Gaydukov, B. A. Constantinov, et al., *Svetotechnika*, No. 3, 22 (1998).
2. I. S. Marshak, V. P. Doinikov, V. P. Jil'tsov, et al., *Pulsed Sources of Light* (Moscow, Energiya Publ. 1978) [in Russian].
3. G. N. Rohlin, *Discharge Sources of Light* (Moscow, Energoatomizdat Publ. 1991) [in Russian].
4. E. M. Voronkova, B. N. Grechushnikov, G. I. Dystler, and V. P. Petrov, *Optical Materials for Infra-Red Technique* (Moscow, Nauka, 1965) [in Russian].
5. D. O. Wharmby, *NATO Adv. Study Inst. Pitlochry* **5**, 327 (1986).
6. T. H. Rautenberg and P. D. Jonson, *J. Appl. Phys.* **48** (6), 2270 (1977).
7. J. T. Dakin and T. H. Rautenberg, *J. Appl. Phys.* **56** (1), 118 (1984).
8. K. Gunther, H.-G. Kloss, T. Lehmann, R. Radtke, and F. Serick, *Contrib. Plasma Phys.* **30** (6), 715 (1990).
9. S. V. Gavrish, V. M. Gradov, E. Y. Terent'ev, et al., *Svetotechnika*, No. 5, 12 (2008).
10. V. M. Gradov, S. V. Gavrish, and I. V. Rudakov, *Vestnik MGTU. Priborostroenie*, No. 6, 130 (2017).
11. L. M. Byberman, V. S. Vorobiev, and I. T. Yakubov, *Non-equilibrium low-temperature plasma kinetics* (Moscow, Nauka, 1982) [in Russian].
12. S. V. Gavrish, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 45 (2010).
13. S. V. Gavrish, *Applied mechanics and technical physics* **52** (6), 92 (2011).
14. S. V. Gavrish, A. Y. Kobzar', D. N. Kugushev, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 2, 85 (2010).
15. S. V. Gavrish, A. Y. Kobzar', V. V. Loginov, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 1, 53 (2009).
16. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, S. V. Puchnina, and A. V. Surdo, *Oboronnyi complex – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*, No. 1, 49 (2014).
17. V. B. Brailovskiy, S. V. Gavrish, and A. E. Ryjkov, *Kontrol'. Diagnostika*, No. 2, 49 (2007).
18. S. V. Puchnina, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 9, 21 (2015).
19. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, *Svarochnoe Proizvodstvo*, No. 1, 31 (2014).
20. S. V. Gavrish, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 42 (2011).