

**СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ МОЩНОГО  
ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С САПФИРОВЫМИ ОБОЛОЧКАМИ**

В.М. Градов<sup>1</sup>  
С.В. Гавриш<sup>2</sup>  
И.В. Рудаков<sup>1</sup>

gradov@bmstu.ru  
svgavr@list.ru  
irudakov@yandex.ru

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «Специальное конструкторское бюро «Зенит», Зеленоград,  
Москва, Российская Федерация

**Аннотация**

Описана математическая модель разряда в смеси цезия и ртути с ксеноном, стабилизированного системой из двух сапфировых оболочек. Модель применена для исследования радиационных характеристик источников мощного инфракрасного излучения в диапазонах значений 1,8...4,2 мкм и 3,0...5,0 мкм. Приведены данные по оптическому коэффициенту поглощения в зависимости от температуры, давления и соотношения компонентов металлогазовой плазмы. Показана значительная роль линейчатой составляющей в формировании сложной дискретно-непрерывной структуры спектров поглощения и излучения. Проведено исследование трансформации спектральных распределений излучения импульсно-периодических разрядов по мере прохождения пакета импульсов. Установлен факт существенного перераспределения излучения между дискретной и непрерывной составляющими. Исследовано влияние массового соотношения компонентов и геометрии источников на пиковую мощность излучения. Показано, что увеличение доли цезия в смеси может приводить как к возрастанию пиковой мощности излучения, так и к ее снижению в зависимости от электрической мощности, что определяется изменением вклада в перенос излучения линейчатой и непрерывной составляющих при изменении оптической плотности плазмы. Установлено, что при электрической мощности около 2 кВт/см можно подобрать такие параметры источника излучения, которые обеспечивают пиковую мощность излучения в двух указанных диапазонах на уровне 120 и 60 Вт/см, что подтверждается экспериментальными данными с точностью 8...15 %

**Ключевые слова**

*Источник излучения, импульсная плазма, цезий, ртуть, инфракрасная область, математическое моделирование, спектр излучения*

Поступила в редакцию 25.01.2018  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

**Введение.** Импульсно-периодические источники излучения инфракрасного диапазона (ИК) с длиной волны более 3,5 мкм применяют в оптико-электронных приборах, предназначенных для использования в качестве активных средств защиты летательных аппаратов от систем самонаведения по тепловому излучению поражае-

мого объекта. Такие источники представляют собой специальный класс разрядных трубчатых ламп со двояной сапфировой оболочкой, стабилизирующей разряд в смеси паров цезия и ртути с ксеноном. Зазор между оболочками заполнен смесью инертных газов, обеспечивающей теплоотвод от внутренней трубки. Тепловой режим лампы поддерживается за счет принудительного воздушного охлаждения снаружи. Прибор работает в режиме периодического следования импульсов, имеющих сложную структуру, за счет чего происходит модуляция излучения с заданными технологическими параметрами по длительности импульсов, частоте, пиковой мощности излучения (ПМИ) в фиксированном интервале спектра и глубине модуляции, гарантирующими определенный уровень защиты объекта [1–3].

Глубина модуляции излучения — отношение переменной (модулируемой) составляющей излучения к суммарному излучению ИК-источника, включающему в себя кроме модулируемой и постоянную составляющую, возникающую, в частности, за счет излучения инерционных в тепловом отношении оболочек. Указанные характеристики зависят от большого числа параметров (давления плазмы, состава компонентов, электрического напряжения на лампе, тока дежурной дуги, диаметра разрядной трубки, толщины оболочек и др.).

Согласно данным, приведенным в работах [3–5], уровень ПМИ импульса и глубина модуляции (относительная доля превышения импульса излучения над постоянной составляющей теплового лучистого потока) связаны друг с другом, и ослабление требований к одному параметру ужесточает требования к другому. Возникает задача многопараметрической оптимизации излучателей, что делает актуальной работу по созданию соответствующих математических моделей процессов, реализующего их программного обеспечения и базы данных по теплофизическим и оптическим характеристикам многокомпонентной нестационарной плазмы и конструкционных материалов прибора (в последнем случае речь идет об оптическом коэффициенте поглощения сапфира, привязанном к длине волны и температуре).

Важнейшей характеристикой рассматриваемых в настоящей работе источников, построенных на сильно излучающих разрядах в смесях паров металлов, является спектральное распределение излучения сложного дискретно-непрерывного состава в широкой области, а также интегральный выход лучистой энергии в узких интервалах длин волн, на которые настроены приемники. Причем спектры излучения плазмы существенно меняются в процессе прохождения импульса тока.

Данные о спектрах излучения и их связи с эксплуатационными характеристиками источников рассматриваемого типа в литературе представлены недостаточно. Особенности конструкции и технологические аспекты изготовления сапфировых ламп описаны в работе [6]. Расчеты теплофизических характеристик ламп с использованием моделей квазистационарного приближения [7] проведены в работе [8], в рамках комплексной модели излучателя в работе [9] исследованы электрофизические характеристики ламп. Модель цезиевой лампы, рассматриваемой в качестве эффективного источника освещения, и анализ ее характеристик приведены в работе [10].

Экспериментальное исследование и оптимизация спектрально-энергетических характеристик ламп представляет собой сложную и трудоемкую задачу ввиду большого числа электрических, физических и геометрических характеристик, определяющих работу приборов. В связи с этим особое значение приобретает математический эксперимент, построенный на моделях, которые максимально реалистично учитывают особенности протекания нестационарных процессов в разряде, оболочках, внешней электрической цепи, и обеспечивающий проведение исследования всего комплекса физических явлений, развивающихся в плазме разряда, стабилизирующих его оболочках и внешнем электрическом контуре с дежурной дугой и транзисторным ключом.

**Постановка задачи.** Математическая модель источника излучения приведена в работе [9]. Она описывает процессы в разрядной многокомпонентной нестационарной слабонеидеальной плазме смеси паров цезия и ртути с ксеноном, температурное состояние системы из двух цилиндрических полупрозрачных оболочек, разделенных газовым зазором, перенос излучения в разряде и оболочках, а также внешний электрический разрядный *LCR*-контур с высокоточным транзисторным коммутатором.

Соответствующий программно-алгоритмический комплекс, реализующий указанную математическую модель, построен так, что в качестве входных данных задаются величины, используемые при проведении обычных натуральных экспериментов: параметры разрядного контура (емкость, индуктивность, активное сопротивление, ток дежурной дуги, время срабатывания транзисторного ключа, начальное напряжение на конденсаторе); параметры разрядного канала (масса металлических компонент, давление буферного газа, диаметр и длина разрядного промежутка, анодно-катодное падение потенциала); геометрические характеристики системы оболочек (диаметры цилиндрических поверхностей, толщины оболочек и зазора между ними, параметры воздушного потока, определяющие коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности). Большие возможности программно-алгоритмического комплекса подтверждены при выполнении поисковых работ и оптимизации параметров и режимов функционирования источников рассматриваемого типа и многих др.

Для проведения полномасштабных вычислительных экспериментов необходимо полноценное информационное обеспечение моделей, которое включает в себя базы данных по материальным функциям плазмы, точно привязанным к температуре, давлению и соотношению компонент, и теплофизическим свойствам конструктивных элементов. В настоящей работе в подавляющем большинстве случаев термодинамические, транспортные и оптические характеристики плазмы получены расчетом.

Коэффициенты электропроводности, электронной теплопроводности, теплопроводности тяжелых частиц, энтальпия, коэффициент оптического поглощения вычислялись по методике, изложенной в работах [11–13].

Основными радиационными процессами, определяющими коэффициент поглощения многокомпонентной атомарной плазмы, являются фотоионизация

атомов и ионов, обратное торможение электронов в полях нейтральных частиц и ионов, дискретные переходы связанных электронов. В случае локального термодинамического равновесия суммарный коэффициент поглощения зависит от длины волны излучения, температуры и давления плазмы.

Дискретный спектр формируется в результате перекрытия крыльев линий, уширенных различными механизмами — штарковским, резонансным, доплеровским, вандерваальсовым [8]. Профиль линии считается фойхтовским. Вся информация о квантовых характеристиках уровней энергии цезия, ртути и ксенона, необходимая для расчета статистических сумм, вероятностей спонтанных радиационных переходов, сечений фотоионизации и т. д. заимствована из работ [14–18]. Узость спектральных линий при большом их количестве сильно осложняет решение задач лучистого переноса. В настоящей работе выполнено прямое интегрирование по частоте спектральных величин [19].

Комплексная математическая модель прибора реализована численными методами [20, 21]. Решение дифференциальных уравнений в частных производных и обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка выполнено методом конечных разностей, разностные схемы получены интегроинтерполяционным методом, а их аппроксимация проведена на трех видах сеток: 1) равномерных; 2) квазиравномерных; 3) сетках с фиктивными узлами.

Перенос излучения в полупрозрачных оболочках в приближении Шустера — Шварцшильда и развитие процессов в разрядном контуре поставлены как задачи Коши. В этом случае применяют методы Рунге — Кутты четвертого порядка точности, а также неявные схемы типа Гира. Последние схемы особенно актуальны при решении электротехнических уравнений внешней цепи, так как система этих уравнений на переднем фронте импульса тока вследствие высоких значений активного сопротивления плазменного канала относится к жесткому типу.

**Результаты моделирования и эксперимента.** Данные по оптимизированному источнику излучения с размерами промежутка  $R = 0,55$  см,  $L = 3,5$  см приведены ниже. Содержание цезия и ртути в разряде составляет 1,3 и 2,0 мг соответственно. Разрядный контур характеризуется следующими параметрами: напряжение на конденсаторе 120 В; индуктивность 8 мкГн; емкость конденсатора 0,01 Ф; активное сопротивление контура 0,026 Ом; ток дежурной дуги 1 А. Время, через которое принудительно обрывается напряжение на конденсаторе, т. е. длительность импульса напряжения, составляет 260 мкс. Электрический режим для технологических задач отработки конструкции реализуется в виде пакетов из трех импульсов с частотой 1600 Гц в пакете, частота следования пакетов 150 Гц.

Установившийся режим работы лампы достигается за время прохождения около 10 пакетов импульсов для формирования регулярного теплового режима в разряде и более 32 000 пакетов — в стенке. Это существенно осложняет процедуру вычислительного эксперимента ввиду высокой трудоемкости расчетов.

По результатам моделирования и эксперимента напряжение на разрядном промежутке (рис. 1) по мере нарастания тока падает в каждом импульсе при-

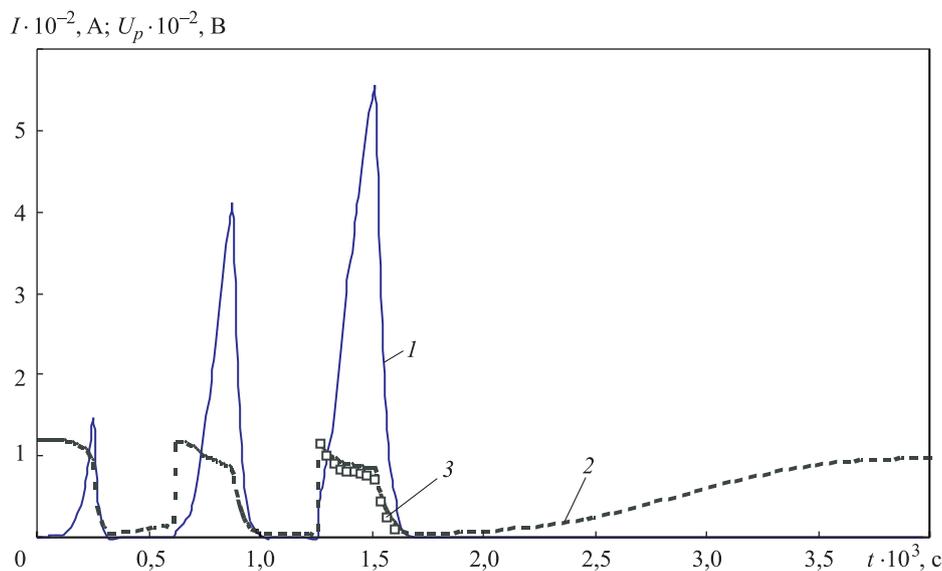
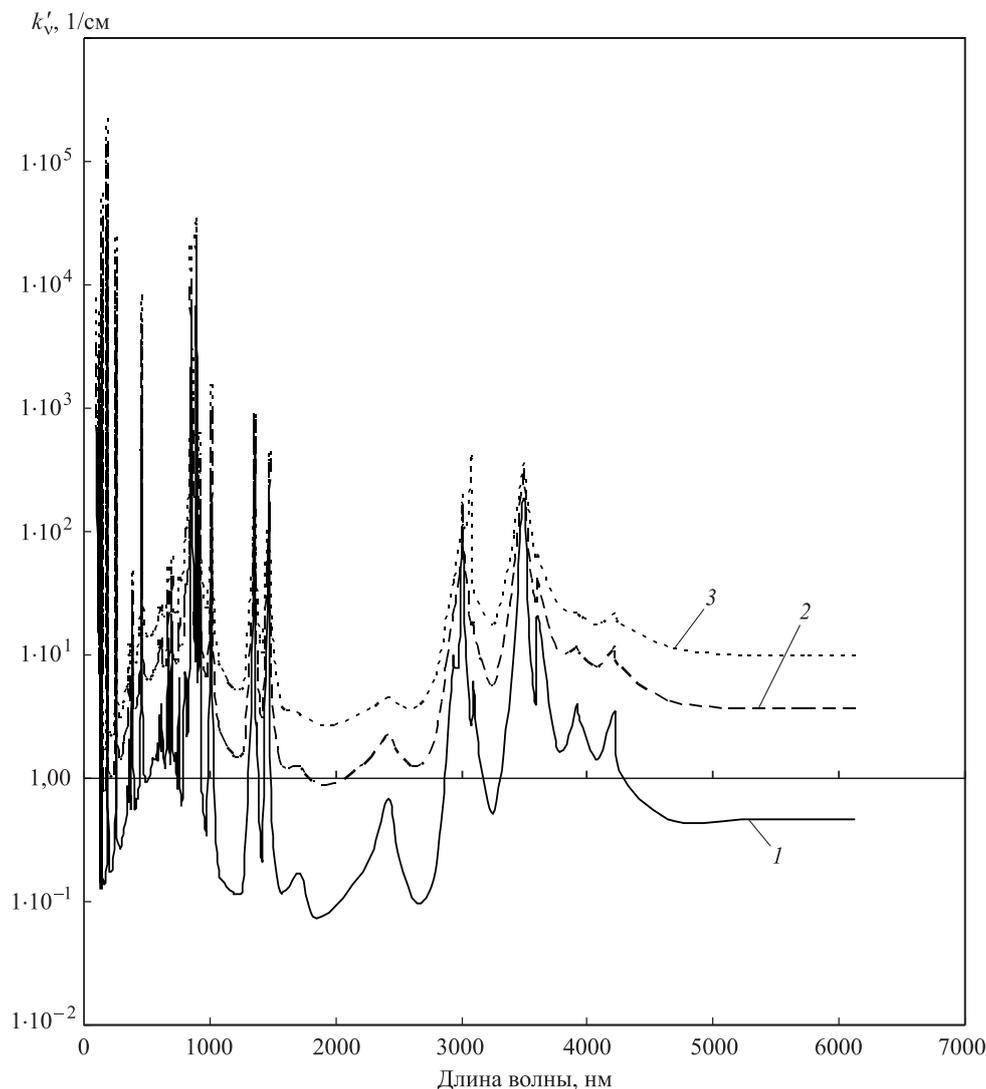


Рис. 1. Зависимости тока (1), напряжения на лампе (2, 3) от времени в трех импульсах при установившемся режиме работы (2, 3 — расчетные и экспериментальные значения)

мерно на 25 % вследствие увеличения напряжения на индуктивности. Импульсы тока, как и импульсы излучения, имеют пилообразную форму. Максимальный ток и интенсивность излучения в серии достигаются только в последнем, третьем импульсе, и этот ток заметно превышает ток первого импульса. Указанное обстоятельство связано с тем, что начальное состояние разрядного канала перед первым и последним импульсами сильно отличается. Если последний импульс начинается при достаточно развитом канале, подготовленном двумя предыдущими импульсами, то перед первым импульсом разрядный промежуток успевает прийти ближе к состоянию дежурной дуги.

Зависимость коэффициента поглощения  $k'_\nu$  плазмы Cs–Hg–Xe при температуре 4000 К и различных значениях давления от длины волны приведена на рис. 2. Хорошо заметна развитая линейчатая структура спектра поглощения в широком диапазоне давлений. Достаточно сильная группа линий расположена в ИК-области 3...4 мкм, она проявляется не только при низком значении температуры, но сохраняется и при более высоких ее значениях. При температуре плазмы 2000 К, характерной для дежурной дуги, коэффициент поглощения в области более 4 мкм, обусловленный свободно-свободными переходами электронов в полях нейтральных частиц и ионов, мал, поэтому нагрев плазмы излучением раскаленной до температуры 1600...1900 К стабилизирующей разряд оболочки оказывается небольшим. С повышением температуры плазмы коэффициент  $k'_\nu$  резко увеличивается. Например, при изменении температуры в пределах 2000...7000 К (и соответствующем росте заселенностей верхних уровней атома цезия) коэффициент поглощения в диапазоне значений 3...6 мкм изменяется почти на два порядка.



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента поглощения плазмы Cs–Hg–Xe от длины волны при температуре плазмы 4000 К и значениях давления  $p = 0,1$  (1),  $0,5$  (2) и  $1$  (3) МПа (соотношение концентраций тяжелых частиц компонентов Cs:Hg и Cs:Xe 1:1,5)

При более высоких значениях давления коэффициент поглощения увеличивается пропорционально, при этом линии за счет роста концентрации частиц становятся шире, занимая все более обширные спектральные области, и образуют перекрывающиеся пакеты — квазиконтинуумы, налагающиеся на истинный непрерывный спектр (см. рис. 2). В вершинах линий коэффициент поглощения достигает значений  $10^3 \dots 10^4 \text{ см}^{-1}$ .

Отметим, что несмотря на отчетливо выраженную линейчатую составляющую суммарного спектра в поглощении, в излучении картина не обязательно будет точно такой же. Все определяется оптической плотностью плазмы, кото-

рая зависит как от распределения коэффициента по радиусу, так и от длины траектории луча в плазме. При больших значениях оптической плотности (больше 1–3) линейчатая структура спектра в излучении сильно нивелируется, и спектр по виду весьма близок к сплошному.

Спектры излучения разряда в различные моменты времени в течение периода прохождения пакета импульсов приведены на рис. 3.

Спектры излучения в конце третьего самого мощного импульса (в максимуме тока) (рис. 3, а) и в конце серии импульсов (рис. 3, б) при остывшей плазме кардинально отличаются. В конце импульса температура и давление плазмы значительно более высокие, в итоге во многих спектральных диапазонах явно наблюдается спектр поглощения. Понятно, что многие линии самообращены, но, например, в области 600...800 нм имеет место поглощение выходящего из горячей центральной области непрерывного излучения линиями в холодной пристеночной зоне. Такой эффект особенно заметен при увеличении давления. Линейчатая структура спектра, отчетливо выраженная в коэффициенте поглощения, здесь сильно сглаживается.

Перед первым импульсом, когда плазма разрежена, линейчатая составляющая спектра проявляется в полной мере (см. рис. 3, б). Отметим, что в течение импульса в ходе изменения термодинамического состава плазмы и смены механизмов формирования излучения сильно меняется соотношение спектральных компонентов.

Результаты расчета ПМИ разряда при различных характеристиках лампы, полученные в серии численных экспериментов, приведены на рис. 4. Здесь под пиковой мощностью излучения понимается максимальная по времени импульса мощность излучения источника, измеряемая в Вт/ср. Как было отмечено выше, ПМИ достигается всегда в конце импульса напряжения в максимуме тока. Рассматриваемая в работе ПМИ представляет собой максимум мощности в третьем самом мощном импульсе.

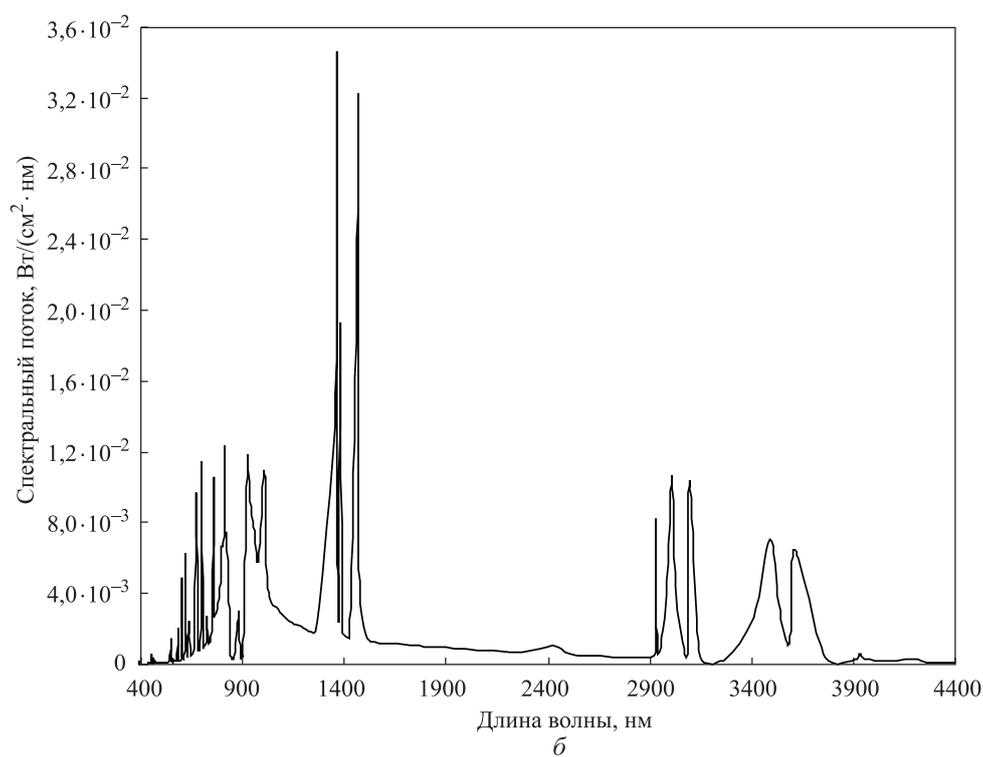
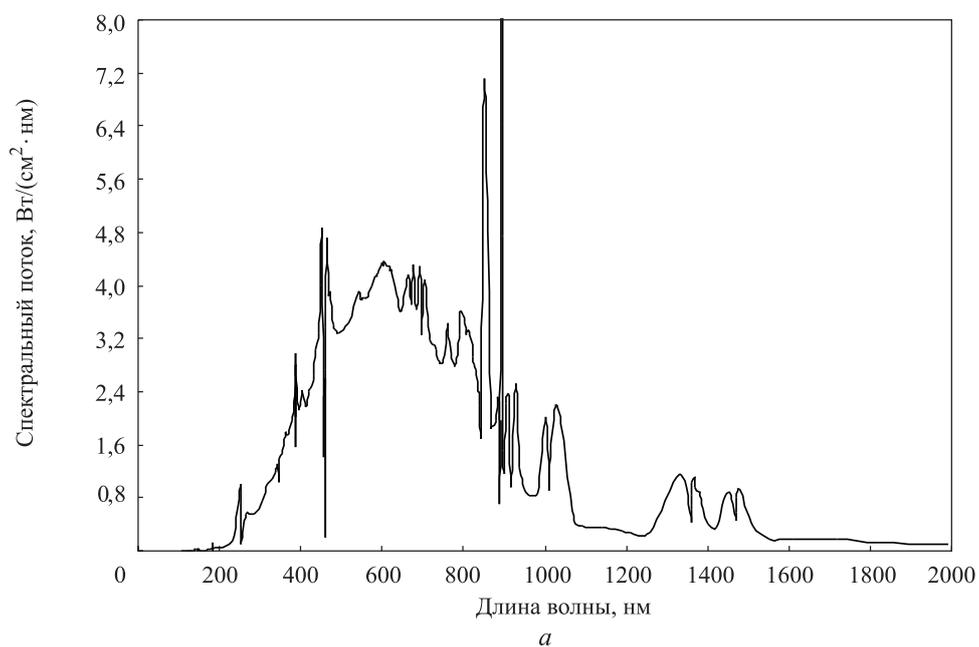
В расчетах определена ПМИ  $I_{\Delta\lambda}$  в спектральных областях 1,8...4,2 мкм (диапазон 1) и 3...5 мкм (диапазон 2), при этом варьировались массы плазмообразующих веществ цезия и ртути в разряде, электрическая мощность, вводимая в лампу, размеры разрядного промежутка (диаметр и межэлектродное расстояние).

Результаты расчетов в пределах 8...15 % согласуются с данными экспериментов и позволяют сделать следующие выводы:

1) изменение содержания цезия и ртути в разряде на порядок в пределах 0,53...5,3 мг приводит к изменению пиковой силы света примерно на 25...30 %, причем с ростом массы металлов ПМИ ведет себя по-разному в зависимости от средней электрической мощности  $P_{ср}$ ;

2) максимальное расчетное значение  $I_{\Delta\lambda} = 70$  Вт/ср для диапазона 2 и 120 Вт/ср для диапазона 1 при средней электрической мощности  $P_{ср} = 2$  кВт. При этом в диапазоне 2 максимальное значение  $I_{\Delta\lambda}$  увеличивается с уменьшением содержания цезия и ртути, а для диапазона 1 ситуация обратная;

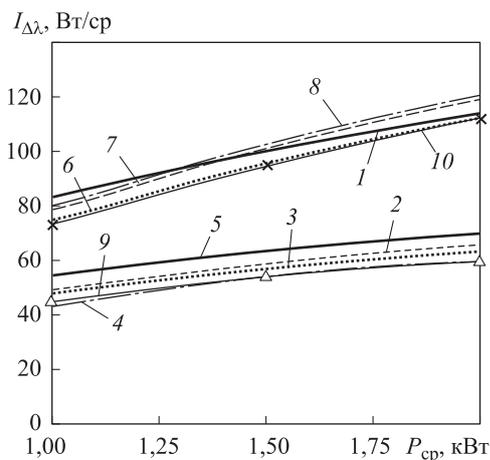
3) переход к диаметру 13 мм не дает заметного увеличения значения  $I_{\Delta\lambda}$ .



**Рис. 3.** Спектральные распределения излучения разряда в конце третьего импульса на 255-й мкс (*a*) и в конце серии на 5530-й мкс (*б*)

**Рис. 4.** Пиковая мощность излучения разряда в спектральных областях 3...5 мкм (нижняя группа линий — диапазон 2) и 1,8...4,2 мкм (верхняя группа линий — диапазон 1):

$R = 0,55$  см,  $L = 3,5$  см: 1, 5 — масса цезия  $M_{Cs} = 0,5$  мг, масса ртути  $M_{Hg} = 0,8$  мг; 2, 6 —  $M_{Cs} = 1,6$  мг,  $M_{Hg} = 2,4$  мг; 3, 7 —  $M_{Cs} = 2,4$  мг,  $M_{Hg} = 3,6$  мг; 4, 8 —  $M_{Cs} = 5,3$  мг,  $M_{Hg} = 8,0$  мг; 9, 10 —  $R = 0,65$  см,  $L = 3,0$  см,  $M_{Cs} = 2,4$  мг,  $M_{Hg} = 3,6$  мг



**Заклучение.** Применительно к источнику мощного ИК-излучения выполнен анализ параметров концептуальной и математической моделей, предназначенных для исследования радиационных, электро- и теплофизических процессов в плазме, стабилизирующих разряд оболочках, во внешнем разрядном контуре. Модели базируются на соответствующем информационном обеспечении, позволяющем проводить замкнутые расчеты радиационных, газодинамических и тепловых явлений в приборе в постановках сопряженных задач теплообмена. Представлены данные по радиационным характеристикам плазмы разрядов. Показана значительная роль линейчатой составляющей в коэффициенте поглощения и спектрах излучения. Отмечена существенная трансформация спектра в течение времени прохождения серии импульсов. Приведены данные по влиянию различных параметров на основную характеристику ламп — ПМИ в двух спектральных диапазонах, установлено решающее влияние на последнюю массы цезия в смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зубов А. Системы защиты самолетов от переносных зенитных ракетных комплексов MANTA // Зарубежное военное обозрение. 2012. № 1. С. 63–67.
2. Ельцин С.Н., Жуков А.П., Кашин В.М., Рютин В.Б. Оценка эффективности переносных зенитных ракетных комплексов. СПб: Изд-во Балт. ГТУ, 2007. 236 с.
3. Щербинин Р. Головки самонаведения перспективных зарубежных управляемых ракет и авиабомб // Зарубежное военное обозрение. 2009. № 4. С. 64–68.
4. Щербинин Р. Системы индивидуальной защиты летательных аппаратов от ПЗРК // Зарубежное военное обозрение. 2005. № 12. С. 37–42.
5. Ольгин С. Проблемы оптоэлектронного противодействия // Зарубежное военное обозрение. 2002. № 9. С. 35–41.
6. Гавриш С.В., Градов В.М., Терентьев Ю.И. Особенности конструкции и работы ламп с сапфировыми оболочками // Светотехника. 2008. № 2. С. 12–18.

7. Градов В.М., Егоров П.С. Моделирование процессов в селективно-излучающих разрядах высокого давления с учетом эффектов неравновесности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2002. № 1. С. 48–58.
8. Градов В.М., Щербаков А.А., Яковлев А.В. Исследование оптических и электрофизических характеристик ламп накачки с парами щелочных металлов // Электронная техника. Сер. 4: Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1984. №1/100. С. 23–30.
9. Градов В.М., Гавриш С.В., Рудаков И.В. Моделирование электрофизических процессов в импульсно-периодических трубчатых источниках мощного инфракрасного излучения с сапфировыми оболочками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 6. С. 130–145. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-130-145
10. Бакиит Ф.Г., Лапишин В.Ф. Перенос энергии излучением в аксиально-симметричной ЛТР-плазме в условиях импульсного разряда высокого давления в цезии // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 183–188.
11. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматлит, 2008. 656 с.
12. Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизованные газы. М.: Мир, 1976. 496 с.
13. Жданов В.М. Процессы переноса в многокомпонентной плазме. М.: Физматлит, 2009. 280 с.
14. Atomic spectra database // NIST: веб-сайт.  
URL: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database> (дата обращения: 25.12.2017).
15. Saloman E.B. Energy levels and observed spectral lines of Xenon, XeI through XeLIV // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2004. Vol. 33. Iss. 3. P. 765–843. DOI: 10.1063/1.1649348
16. Sansonetti J.E. Wavelength, transition probabilities and energy levels for the spectra of Cesium (CsI–CsLV) // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2009. Vol. 38. Iss. 4. P. 761–923. DOI: 10.1063/1.3132702
17. Saloman E.B. Wavelength, energy levels classifications and energy levels for the spectrum of neutral mercury // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2006. Vol. 35. Iss. 4. P. 1519–1548.  
DOI: 10.1063/1.2204960
18. Суржииков С.Т. Оптические свойства газов и плазмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 576 с.
19. Градов В.М., Ломовской И.В. К теории селективно излучающих разрядов с сильной неравновесностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2004. № 4. С. 40–68.
20. Калиткин Н.Н. Численные методы. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 592 с.
21. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Численные методы решения задач конвекции–диффузии. М.: Либроком, 2015. 248 с.

**Градов Владимир Михайлович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Гавриш Сергей Викторович** — канд. техн. наук, АО «Специальное конструкторское бюро «Зенит» (Российская Федерация, 124489, Москва, Зеленоград, Панфиловский пр-т, д. 10).

**Рудаков Игорь Владимирович** — канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Градов В.М., Гавриш С.В., Рудаков И.В. Спектрально-энергетические характеристики импульсно-периодических источников мощного инфракрасного излучения с сапфировыми оболочками // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 3. С. 91–103. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-3-91-103

**SPECTRAL-ENERGY CHARACTERISTICS OF REPETITIVELY-PULSED SOURCES OF POWERFUL INFRARED RADIATION WITH SAPPHIRE SHELLS**

V.M. Gradov<sup>1</sup>

gradov@bmstu.ru

S.V. Gavrish<sup>2</sup>

svgavr@list.ru

I.V. Rudakov<sup>1</sup>

irudakov@yandex.ru

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC Special Design Bureau Zenit, Zelenograd, Moscow, Russian Federation

---

**Abstract**

The study focuses on a mathematical model of the discharge in a mixture of cesium, mercury and xenon, the discharge being stabilized by a system of two sapphire shells. The model is used to examine the radiation characteristics of sources of powerful infrared radiation in the ranges 1.8...4.2  $\mu\text{m}$  and 3.0...5.0  $\mu\text{m}$ . The study gives data on the optical absorption coefficient as a function of temperature, pressure, and the ratio of the components of the metal-gas plasma. Moreover, the significant role of the line component in the formation of a complex discrete-continuous structure of the absorption and radiation spectra is shown. We also did research into the transformation of spectral distributions of repetitively-pulsed discharges with the pulse burst pass. The fact of a significant redistribution of radiation between discrete and continuous components is established. The influence of the mass ratio of the components and the geometry of the sources on the peak radiation power (PRP) is investigated. The study shows that an increase in the proportion of cesium in the mixture can lead to both an increase in the PRP and its decrease as a function of the electric power, that is determined by the change in the contribution to the radiation transfer of the line and continuous components with a change in the optical density of the plasma. Results suggest that at an electric power of the order of 2 kW/cm, it is possible to select such parameters of the radiation source that provide the PRP in the two specified ranges at the level of 120 and 60 W/cm, which is confirmed by experimental data with an accuracy of 8...15 %

**Keywords**

*Radiation source, pulsed plasma, cesium, mercury, infrared region, mathematical simulation, radiation spectrum*

Received 25.01.2018

© BMSTU, 2018

---

**REFERENCES**

- [1] Zubov A. Aircraft protection system from MANTA man-portable air defense system. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2012, no. 1, pp. 63–67 (in Russ.).

- [2] El'tsin S.N., Zhukov A.P., Kashin V.M., Ryutin V.B. Otsenka effektivnosti perenosnykh zenitnykh raketnykh kompleksov [Efficiency assessment of the ground man-portable air defense systems]. Saint Petersburg, Baltiyskiy GTU Publ., 2007. 236 p.
- [3] Shcherbinin R. Target seekers of advanced foreign guided missiles and air bombs. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2009, no. 4, pp. 64–68 (in Russ.).
- [4] Shcherbinin R. Aircraft self-defense systems from man-portable air defense system. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2005, no. 12, pp. 37–42 (in Russ.).
- [5] Ol'gin S. Problems of optoelectronic countermeasures. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2002, no. 9, pp. 35–41 (in Russ.).
- [6] Gavrish S.V., Gradov V.M., Terent'yev Yu.I. Design and operation features of lamps with sapphire shell. *Svetotekhnika*, 2008, no. 2, pp. 12–18 (in Russ.).
- [7] Gradov V.M., Egorov P.S. Simulation of processes in selectively radiating discharge of high pressure with regard to effects of non-equilibrium conditions. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2002, no. 1, pp. 48–58 (in Russ.).
- [8] Gradov V.M., Shcherbakov A.A., Yakovlev A.V. Research of optical and electro-physical properties of pump lamps with alkali metal vapor. *Elektronnaya tekhnika. Ser. 4: Elektrovakuumnye i gazorazryadnye pribory*, 1984, no.1/100, pp. 23–30 (in Russ.).
- [9] Gradov V.M., Gavrish S.V., Rudakov I.V. Simulation of electrophysical processes in pulse-periodic tubular sources of powerful infrared radiation with sapphire shells. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 6, pp. 130–145 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2017-6-130-145
- [10] Baksht F.G., Lapshin V.F. Radiative energy transfer in axial-symmetric LTE plasma in conditions of pulse high pressure cesium discharge. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2013, vol. 1, no. 2, pp. 183–188 (in Russ.).
- [11] Zel'dovich Ya.B., Rayzer Yu.P. Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 656 p.
- [12] Mitchner M., Kruger Ch.H. Partially ionized gases. Wiley, 1973. 518 p.
- [13] Zhdanov V.M. Protsessy perenosa v mnogokomponentnoy plazme [Transfer process in high-temperature plasma]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 280 p.
- [14] Atomic spectra database. NIST: website. Available at: <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database> (accessed: 25.12.2017).
- [15] Saloman E.B. Energy levels and observed spectral lines of Xenon, XeI through XeLIV. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2004, vol. 33, iss. 3, pp. 765–843. DOI: 10.1063/1.1649348
- [16] Sansonetti J.E. Wavelength, transition probabilities and energy levels for the spectra of Cesium (CsI–CsLV). *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2009, vol. 38, iss. 4, pp. 761–923. DOI: 10.1063/1.3132702
- [17] Saloman E.B. Wavelength, energy levels classifications and energy levels for the spectrum of neutral mercury. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 2006, vol. 35, iss. 4, pp. 1519–1548. DOI: 10.1063/1.2204960
- [18] Surzhikov S.T. Opticheskie svoystva gazov i plazmy [Optical properties of gases and plasma]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 576 p.
- [19] Gradov V.M., Lomovskoy I.V. To theory of selectively radiating strong non-equilibrium discharges. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2004, no. 4, pp. 40–68 (in Russ.).

[20] Kalitkin N.N. Chislennyye metody [Numerical methods]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011. 592 p.

[21] Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. Chislennyye metody resheniya zadach konveksii–diffuzii [Numerical methods for solving convection–diffusion problems]. Moscow, "LIBROKOM" Book house, 2015. 248 p.

**Gradov V.M.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor of Computer Software and Information Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Gavrish S.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of the research and production complex of special radiation sources, JSC Special Design Bureau Zenit (Panfilovsky prospekt 10, Moscow, Zelenograd, 124489 Russian Federation).

**Rudakov I.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of Computer Software and Information Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Gradov V.M., Gavrish S.V., Rudakov I.V. Spectral-Energy Characteristics of Repetitively-Pulsed Sources of Powerful Infrared Radiation with Sapphire Shells. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 3, pp. 91–103 (in Russ.). DOI: 10.18698/0236-3933-2018-3-91-103