

ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ С РАЗРЯДОМ В СМЕСИ ПАРОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

С.В. Гавриш

svgavr@list.ru

В.В. Логинов

loginov_v@bk.ru

ООО «НПП «Мелитта», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Приведены результаты исследований серийных импульсных источников ИК-излучения на основе разряда в парах цезий-ртуть-ксеноновой смеси. Для создания экологически чистого газоразрядного источника и повышения пиковой силы излучения предложено заменить ртутный буфер в серийной лампе на пары рубидия. На основе термодинамического анализа доказана необходимость использования цезия в качестве основного компонента плазмообразующей среды импульсных источников ИК-излучения. Установлено, что введение в цезиевый разряд менее 25 % (мас.) рубидия обеспечивает требуемое давление паров цезия и теплопроводность плазмы. Показано, что масса сплава с цезием играет важную роль в переходе разряда из ненасыщенных паров в насыщенные. Приведены результаты сопоставления пиковой силы ИК-излучения исследуемых газоразрядных ламп в зависимости от амплитуды и длительности питающих напряжений при работе в импульсно-периодическом режиме. Разработана методика для сравнения энергетической эффективности исследуемых разрядов и выполнены спектральные исследования, которые подтвердили преимущества импульсного источника ИК-излучения на основе цезий-рубидий-ксенонового разряда перед серийными газоразрядными лампами

Ключевые слова

Импульсный разряд, цезий, ртуть, рубидий, ИК-излучение, давление паров, теплопроводность

Поступила 14.10.2022

Принята 02.11.2022

© Автор(ы), 2023

Введение. Источники ИК-излучения на основе импульсного (модулируемого) разряда в парах цезий-ртуть-ксеноновой смеси (Cs-Hg-Xe газоразрядные лампы) доказали свою эффективность в качестве функционального элемента оптико-электронных систем (ОЭС), создающих импульсно-периодическую структуру ИК-помехи [1–3]. Основными эксплуатационными параметрами Cs-Hg-Xe газоразрядной лампы являются пиковая сила

$I_{\text{пик}}$ импульса излучения (40 Вт/ср) и глубина модуляции m (95 %) в среднем ИК-диапазоне оптического спектра. Повышение указанных характеристик при сохранении энергопотребления газоразрядной лампой и исключение ртути из состава плазмообразующей среды в целях создания экологически чистого импульсного источника ИК-излучения — это актуальное условие для дальнейшего развития современных ОЭС.

Попытки замены ртутного буфера инертным газом повышенного давления предпринимались и ранее, однако такое техническое решение не получило дальнейшего развития в силу возникших трудностей надежного зажигания разряда в газоразрядной лампе.

Другим конструктивным вариантом, способствующим реализации поставленной цели, является введение в состав плазмообразующей среды калия или рубидия вместо ртути. Так, в [4, 5] показано, что добавление в натриевый или цезиевый разряд незначительного количества калия или рубидия позволяет существенно увеличить индекс цветопередачи источника света, что важно для промышленного освещения.

Цель настоящей работы — изучение возможности замены ртутного буфера другим щелочным металлом в Cs-Hg-Xe газоразрядной лампе и исследование влияния внесенных конструктивных изменений на характеристики ИК-излучения.

Теоретический анализ решаемой задачи. Необходимо рассмотреть три основных вопроса.

1. Является ли цезий основным излучающим элементом в плазмообразующей среде газоразрядной лампы, обеспечивающим максимальную эффективность модулируемого излучения в среднем ИК-диапазоне?

2. Какова роль паров ртути в обеспечении электрических параметров и характеристик ИК-излучения?

3. К каким изменениям характеристик плазмообразующей среды на основе чистого цезия приведет введение в ее состав добавки другого щелочного металла?

Преимущества цезия как излучающего элемента в ИК-области оптического спектра в силу приведенных далее свойств описаны в [1, 6].

1. У цезия самый низкий потенциал ионизации ($E_i = 3,89$ В [7]) среди всех химических элементов, применяемых в составе наполнения существующих газоразрядных ламп с металлическими добавками [7]. В связи с этим имеется возможность создать высокую концентрацию электронов в плазмообразующей среде и усилить их рассеяние на ионах и атомах, тем самым повысить эффективность излучения в средней ИК-области.

2. Согласно схеме энергетических уровней атома цезия [8], из-за переходов $n^2D \rightarrow n^2P$ в излучении разряда наблюдаются достаточно интенсивные спектральные линии с длинами волн 3,01 и 3,6 мкм.

3. Увеличение давления паров цезия в разрядном объеме до 1000 мм рт. ст. способствует росту мощности излучения в среднем ИК-диапазоне [6], что обусловлено ростом концентрации атомов и активизации механизмов в плазме, описанных в п. 1.

4. Низкая теплопроводность паров цезия препятствует безызлучательным тепловым потерям и обеспечивает высокую глубину модуляции импульсов ИК-излучения Cs-Hg-Xe газоразрядной лампы.

В силу перечисленных положительных свойств атомов цезия в исследованиях этот элемент принят в качестве основного компонента наполнения импульсного источника ИК-излучения.

Роль ртутного буфера в импульсном разряде заключается в создании градиента потенциала плазменного канала [7] и тем самым в обеспечении возможности повышения электрической мощности разряда. Интенсивное излучение линий ртути наблюдается только на стадии формирования плазменного канала при выходе импульсной лампы в номинальный режим работы [9]. В номинальном режиме работы импульсной лампы (при высоком давлении паров) атомы ртути практически не влияют на суммарную мощность ИК-излучения.

Отрицательным качеством ртути как компонента плазмообразующей среды является ее способность образовывать сплавы с щелочными металлами (амальгамы). Наличие амальгамы в разрядном объеме, согласно закону Рауля, снижает давление компонентов над образовавшимся сплавом, что приводит к уменьшению мощности ИК-излучения импульсной лампы. Указанное явление определяется многими взаимно зависимыми факторами (температурой T самой холодной точки лампы, длиной и диаметром разрядного канала, массой и соотношением компонентов цезия и ртути в амальгаме и т. д. [7]), что существенно затрудняет оптимизацию характеристик импульсного источника ИК-излучения. Можно предположить, что аналогичные трудности будут в случае соединения цезия с другими щелочными металлами.

Необходимо оценить, как при прямой замене ртути щелочным металлом образовавшийся в разрядном объеме сплав влияет на давление паров цезия (интенсивность ИК-излучения) и теплопроводность смеси (глубину модуляции).

Для решения возникших вопросов использована математическая модель, предложенная Петренко Н.Ю. в [10, 11]. Система уравнений

для расчета давления паров цезия и других металлов над сплавами учитываются размеры плазменного канала и заэлектродных объемов, массовое содержание компонентов в плазмообразующей среде, температурное состояние разрядной трубки. Математическая модель расчета теплопроводности многокомпонентных парогазовых смесей, используемых в качестве наполнения в импульсных источниках ИК-излучения, основана на методе Брокау и расчете коэффициентов динамической вязкости.

На первом этапе теоретического анализа выполним проверку предположения о необходимости использования цезия в качестве основного излучающего элемента. Математическая модель реализуется при следующих исходных данных:

- диаметр разрядного канала 11 мм и межэлектродное расстояние 35 мм (далее 11/35);
- суммарная масса металлов в разрядном объеме 10 мг;
- весовое соотношение ртути и щелочного металла составляет 50 : 50 % (вес.);
- температура холодной точки лампы $T = 700 \dots 1500$ К.

Графические результаты расчета зависимости давления паров щелочных металлов над сплавом (амальгамой) и теплопроводности плазмообразующей среды от температуры приведены на рис. 1.

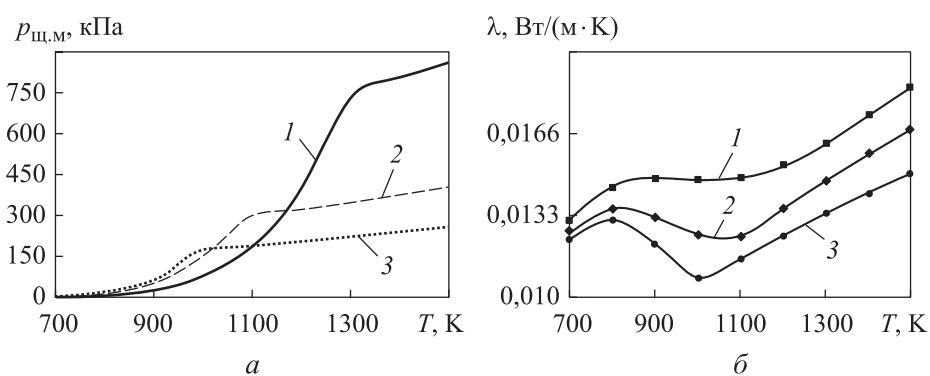


Рис. 1. Зависимости давления паров щелочных металлов (К-Hg, Rb-Hg, Cs-Hg — 1–3 соответственно) над амальгамой (а) и теплопроводности (б) плазмообразующей среды от температуры холодной точки лампы; массы калия, ртути, рубидия и цезия составляют 5 мг

Результаты анализа позволяют сделать следующие выводы:

- давление паров щелочных металлов растет по экспоненциальной зависимости и при полном их испарении из амальгамы указанная зависимость приобретает линейный характер;

– в диапазоне рабочих температур 1000...1300 К холодной точки газоразрядной лампы давление паров цезия над сплавом с ртутью выше, чем у калия и рубидия;

– теплопроводность паров смеси щелочного металла с ртутью в случае амальгамы является самой низкой из всех рассмотренных вариантов в диапазоне исследованных температур;

– в приведенных зависимостях точка перегиба на кривых соответствует переходу теплофизического состояния разряда из насыщенных паров в ненасыщенную форму.

Следовательно, использование цезия в качестве излучающей добавки в составе плазмообразующей среды на сегодняшний день является самым перспективным техническим решением импульсного источника ИК-излучения.

На втором этапе теоретического анализа рассмотрим, как влияет замена ртути на калий или рубидий в составе плазмообразующей среды на давление паров цезия и теплопроводность (рис. 2). Математическая модель, как и на первом этапе, реализуется для разрядного объема диаметром 11 мм и с межэлектродным расстоянием 35 мм, заполненным сплавом массой 10 мг в весовом соотношении 50 : 50 % (вес.).

В результате анализа зависимостей, приведенных на рис. 2, а, выявлено, что в диапазоне рабочих температур 1000...1300 К холодной точки лампы давление паров цезия одинаково как в случае амальгамы, так и сплава Cs-Rb, что позволяет ожидать высокой эффективности ИК-излучения цезий-рубидий-ксенонового разряда (Cs-Rb-Xe-разряда).

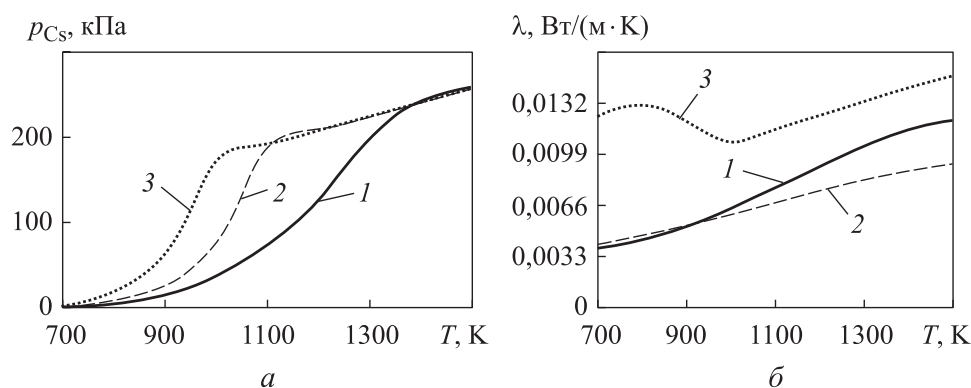


Рис. 2. Зависимости давления паров цезия (Cs-K, Cs-Rb, Cs-Hg — 1–3 соответственно) над амальгамой (а) и теплопроводности (б) плазмообразующей среды от температуры холодной точки лампы; массы цезия, калия, рубидия и ртути составляют 5 мг

Теплопроводность смеси паров Cs-Rb-сплава уступает всем вариантам наполнения, приведенным на рис. 2, б, что влияет на модуляционные характеристики излучения газоразрядной лампы. Однако эта проблема легко решается путем увеличения расхода и скорости воздушного потока, охлаждающего лампу. Основным направлением дальнейших исследований является изучение характеристик плазмообразующей среды на основе смеси паров Cs-Rb-сплава.

На третьем этапе теоретического анализа определим оптимальное весовое соотношение цезия и рубидия в составе наполнения импульсного источника ИК-излучения. На этом этапе сохранены без изменений все исходные данные моделирования: размер разрядного объема 11/35, суммарная масса Cs-Rb-сплава 10 мг. Переменными параметрами являлись весовые соотношения компонентов цезия и рубидия. Зависимости давления паров цезия и теплопроводности плазмообразующей среды на основе Cs-Rb-сплава от температуры холодной точки лампы приведены на рис. 3. Изучено три состава плазмообразующей среды Cs : Rb — 25 : 75, 50 : 50, 75 : 25 % (вес.). Давление паров цезия тем выше, чем меньше рубидиевая дозировка в сплаве. Аналогичная тенденция наблюдается с теплопроводностью Cs-Rb-Xe-разряда. Таким образом, дальнейшие экспериментальные исследования импульсных источников ИК-излучения необходимо проводить при следующем соотношении компонентов цезия и рубидия в составе плазмообразующей среды: 75 : 25 % (вес.), т. е. 7,5 мг цезия и 2,5 мг рубидия. Уменьшение дозировки рубидия в сплаве невозможно в силу технологических трудностей изготовления.

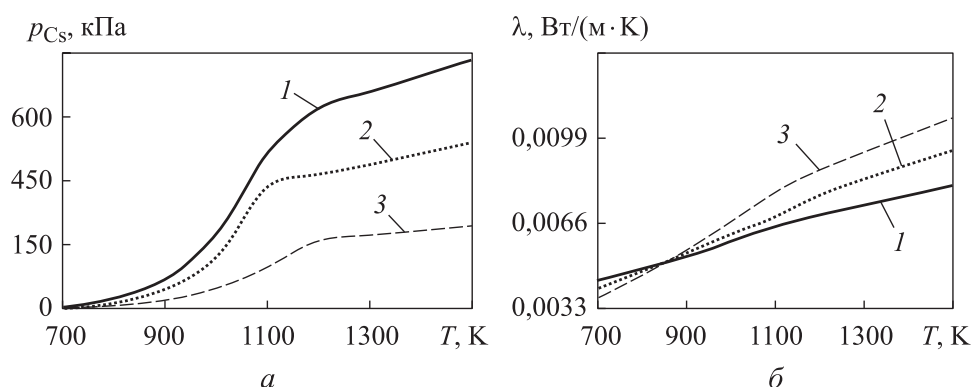


Рис. 3. Зависимости давления (а) паров цезия над сплавом с рубидием и теплопроводности (б) плазмообразующей среды от температуры холодной точки лампы при массах цезия и рубидия, равных 2,5 и 7,5 мг (1); 5 и 5 мг (2); 7,5 и 2,5 мг (3)

Исследование характеристик Cs-Rb-Xe газоразрядной лампы. Разрабатываемая газоразрядная лампа должна обеспечивать импульсно-периодическую структуру ИК-излучения в режимах переменной амплитуды и длительности питаемых напряжений (рис. 4) [1] для эффективного функционирования ОЭС.

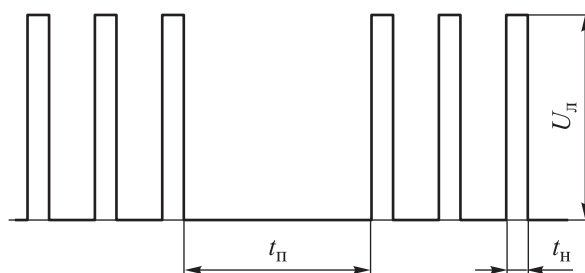


Рис. 4. Импульсно-периодическая структура импульсов напряжения

Для сопоставления характеристик излучения Cs-Hg-Xe и Cs-Rb-Xe газоразрядных ламп использованы конструкция лампы и источник электрического питания, подробно описанные в [1, 12–14]. Особенностью применяемой электрической цепи является возможность варьировать амплитуду напряжения $U_{\text{л}}$ в диапазоне 80...120 В и длительность импульсов напряжения $t_{\text{н}}$ от 100 до 260 мкс. Исследуемая импульсная лампа работала в режиме маломощного вспомогательного разряда, позволяющего сохранять проводящее состояние плазменного канала при паузах между серией импульсов в течение времени $t_{\text{п}}$ (см. рис. 4). Измерения пиковой силы излучения $I_{\text{пик}}$ в среднем ИК-диапазоне проводились с помощью фотодиода ФД-119.

Для подтверждения приведенных ранее заключений выполнено сопоставление пиковой силы излучения Cs-Rb-Xe-разряда с аналогичной характеристикой серийной Cs-Hg-Xe газоразрядной лампы. Отметим, что важным фактором является пиковая сила излучения $I_{\text{пик}}$ в условиях быстрого изменения амплитуды и длительности импульса напряжения, т. е. при варьировании параметров импульсно-периодической структуры (см. рис. 4) оптической помехи ОЭС.

Зависимости пиковой силы излучения от длительности импульса питающего напряжения при постоянстве амплитуды 120 В приведены на рис. 5, а, от амплитуды импульса питающего напряжения $U_{\text{л}}$ — на рис. 5, б. Дальнейший рост напряжений невозможен в силу ограничения функциональных возможностей ОЭС [15].

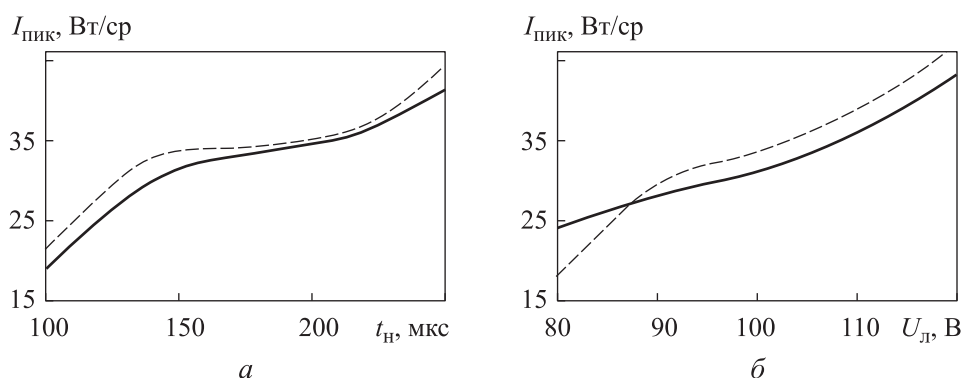


Рис. 5. Зависимости пиковых сил излучений Cs-Rb-Xe (штриховая) и Cs-Hg-Xe (сплошная) газоразрядных ламп от длительности (а) и амплитуды (б) импульса питающего напряжения

Увеличение длительности t_n импульсов напряжения приводит к росту пиковой силы излучения. Это связано с повышением электрической мощности, поступающей в разряд. Как отмечалось ранее, наблюдаемое в диапазоне 150...200 мкс постоянство $I_{\text{пик}}$ связано с процессами перехода разряда в ненасыщенных парах металлов в насыщенное состояние. Устранить такое явление можно, увеличив массу сплавов при наполнении газоразрядной лампы [16].

Аналогично предыдущим результатам наблюдается рост пиковой силы излучения в случае роста амплитудного значения импульса напряжения. На рис. 5, б приведена зависимость пиковой силы напряжения $I_{\text{пик}}$ при фиксированной длительности $t_n = 260$ мкс импульса напряжения. В данном случае ситуация сложнее, так как при любой длительности увеличение U_n может обеспечить требуемое значение пиковой силы ИК-излучения. При этом длительность импульса излучения снижается до значений, неприемлемых для надежного функционирования ОЭС. Наблюдаемое на рис. 5, б в диапазоне $U_n = 80...90$ В отклонение линейности кривой $I_{\text{пик}} = f(U_n)$ связано с нестабильностью Cs-Rb-Xe-разряда при низкой электрической мощности лампы. Таким образом, предложенный вариант конструкции лампы обеспечивает надежное функционирование при перестройке структуры питающих напряжений. В результате можно сделать вывод о преимуществах Cs-Rb-Xe-разряда по сравнению с плазмообразующей средой на основе Cs-Hg-Xe-смеси.

Для окончательного заключения о правомочности результатов проведены спектральные исследования по методике сравнительного анализа.

Суть ее заключается в сопоставлении спектрально-энергетических характеристик излучения различных разрядов при работе газоразрядных ламп в равных эксплуатационных условиях и при одинаковых удельных электрических мощностях. При этом нет необходимости в проведении абсолютизации спектров излучения, так как наложение спектров друг на друга дает четкое представление об энергетическом преимуществе излучения исследуемого разряда в требуемом спектральном диапазоне. Данная методика справедлива только при условии постоянства режимов работы спектрального прибора (при постоянных ширине входной и выходной щелей, удаленности источника от спектрометра, напряжения питания приемника и др.) и фотоприемника (при постоянных спектральной чувствительности, быстродействия и др.). В экспериментах все указанные особенности были строго учтены.

Спектральные исследования импульсных ламп проводились на образцах с размером разрядного объема 11/35. Исследуемый источник ИК-излучения работал в импульсно-периодическом режиме со структурой согласно рис. 4 при удельной электрической мощности 430 Вт/см. Полученные результаты приведены на рис. 6.

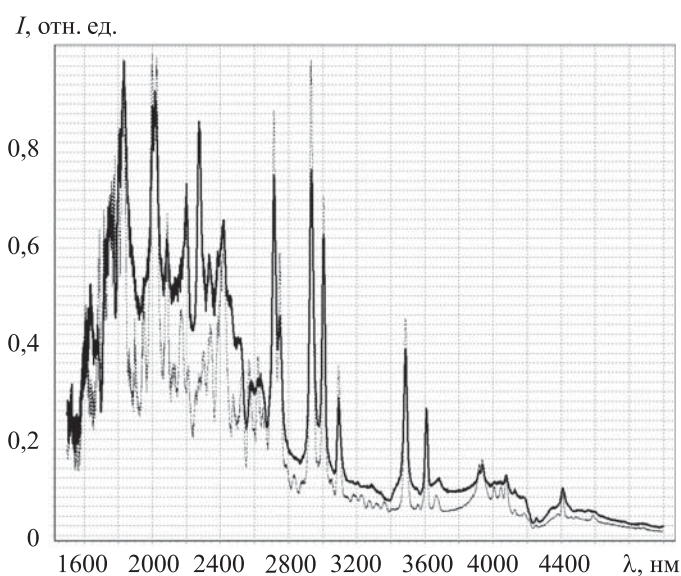


Рис. 6. Спектральное распределение излучения Cs-Rb-Xe- (сплошная) и Cs-Hg-Xe-разрядов (штриховая)

Согласно приведенным данным, суммарная относительная мощность излучения импульсного Cs-Rb-Xe-разряда в спектральном диапазоне 1,6...5,0 мкм значительно выше, чем у Cs-Hg-Xe газоразрядной лампы.

Наличие нескольких интенсивных узких спектральных линий (см. рис. 6) в излучении Cs-Hg-Xe-разряда существенного энергетического преимущества этой импульсной лампе не дают [7].

Результатом проведенных исследований является доказанная высокая эффективность разряда в смеси паров Cs-Rb и возможность прямой замены Cs-Hg-Xe газоразрядной лампы на разработанный источник ИК-излучения без существенных изменений схемы электрического питания ОЭС.

Заключение. В результате проведенных расчетно-теоретического анализа и экспериментальных исследований установлено следующее.

Для создания экологически чистого импульсного газоразрядного источника ИК-излучения необходимо провести замену ртути на рубидий в составе плазмообразующей среды серийной импульсной Cs-Rb-Xe газоразрядной лампы.

Введение в разряд паров рубидия не оказывает существенного влияния на теплопроводность плазмы и давление паров цезия при весовом содержании этого металла менее 25 % (мас.).

Сравнение пиковой силы излучения двух исследуемых разрядов в условиях варьирования амплитуды и длительности импульсов питающих напряжений позволило установить преимущества Cs-Rb-Xe газоразрядной лампы при работе в импульсно-периодическом режиме функционирования ОЭС, что подтверждается приведенными ниже данными.

Сравнение Cs-Hg-Xe и Cs-Rb-Xe газоразрядных ламп

	Cs-Hg-Xe	Cs-Rb-Xe
Пиковая сила излучения $I_{\text{пик}}$, Вт/ср	40	50
Коэффициент глубины модуляции при средней мощности 1500 Вт, %	95	97
Длительность импульса излучения по уровню 0,5 мкс	160	170

Результатом проведенных исследований является доказанная высокая эффективность разряда в смеси паров Cs-Rb и возможность прямой замены Cs-Hg-Xe газоразрядной лампы на разработанный источник ИК-излучения без существенных изменений схемы электрического питания ОЭС.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. Импульсные газоразрядные источники ИК-излучения для оптико-электронных систем. *Успехи прикладной физики*, 2018, т. 6, № 4, с. 333–348.

- [2] Гавриш С.В., Кобзарь А.И. Импульсный газовый разряд как источник оптической помехи в инфракрасной области спектра. *Электронные информационные системы*, 2019, № 2, с. 43–60.
- [3] Гавриш С.В., Гайдуков Е.Н., Константинов Б.А. и др. Разрядные источники инфракрасного излучения для специальных целей. *Светотехника*, 1998, № 3, с. 22–24.
- [4] Логинов В.В. Характеристики излучения импульсно-периодического разряда в парах щелочных металлов. *Прикладная физика*, 2019, № 4, с. 24–28.
- [5] Гавриш С.В. Влияние плазмодинамики натриевого разряда на спектральные характеристики излучения. *Прикладная физика*, 2011, № 3, с. 67–72.
- [6] Otani K. Pulsed alkali metal vapor discharge lamp with ceramics outer envelope. Patent US 487031. Appl. 14.04.1988, publ. 26.09.1989.
- [7] Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. М., Энергоатомиздат, 1991.
- [8] Ключарев А.Н., Янсон М.Л. Элементарные процессы в плазме щелочных металлов. М., Энергоатомиздат, 1988.
- [9] Гавриш С.В. Динамика формирования плазменного канала после зажигания разряда в цезий-ртуть-ксеноновых импульсных лампах. *Прикладная физика*, 2021, № 5, с. 25–31. DOI: <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-5-25-31>
- [10] Гаврилов С.А., Гавриш С.В., Петренко Н.Ю. Термодинамика испарения амальгамы цезия в газоразрядных приборах. *Успехи прикладной физики*, 2018, т. 6, № 6, с. 471–475.
- [11] Петренко Н.Ю. Расчет теплопроводности плазмообразующих сред в зависимости от конструктивных параметров разрядных приборов. *ОКНТПР*, 2017, № 3, с. 59–64.
- [12] Гавриш С.В., Градов В.М., Терентьев Ю.И. Особенности конструкции и работы ламп с сапфировыми оболочками. *Светотехника*, 2008, № 2, с. 12–18.
- [13] Гавриш С.В. Процессы конденсации и испарения амальгамы цезия при выключении и зажигании газоразрядных ламп. *Прикладная физика*, 2018, № 6, с. 84–89.
- [14] Гавриш С.В., Кобзарь А.И., Жмаев В.С. и др. Исследование факторов, определяющих модуляционные характеристики разрядных ИК-источников. *Прикладная физика*, 2009, № 1, с. 53–59.
- [15] Гавриш С.В., Кобзарь А.И., Кутушев Д.Н. и др. Разработка модулируемых цезиевых источников ИК-излучения повышенной мощности. *Прикладная физика*, 2010, № 2, с. 85–90.
- [16] Гавриш С.В. Давление компонентов над амальгамой щелочных металлов в разрядных лампах. *Прикладная механика и техническая физика*, 2011, т. 52, № 6, с. 92–99.

Гавриш Сергей Викторович — д-р техн. наук, начальник отдела источников света ООО «НПП «Мелитга» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Логинов Владимир Владимирович — канд. техн. наук, начальник цеха источников света ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гавриш С.В., Логинов В.В. Импульсные источники ИК-излучения с разрядом в смеси паров щелочных металлов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 3 (144), с. 4–17.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-4-17>

**IR-RADIATION PULSED SOURCES WITH A DISCHARGE
IN THE ALKALI METAL VAPORS MIXTURE**

S.V. Gavrish

svgavr@list.ru

V.V. Loginov

loginov_v@bk.ru

LLC “SPE “Melitta”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents results of research aimed at improving the serial pulsed sources of the IR-radiation based on a discharge in the cesium-mercury-xenon vapor mixture. To create the environmentally friendly gas-discharge source and increase the peak radiation strength, it proposes to replace the mercury buffer in a serial lamp with the rubidium vapor. Based on the thermodynamic analysis, necessity of using cesium as the main component in the plasma-forming medium of IR-radiation pulsed sources was proved. It was established that introduction into the cesium discharge of less than the 25 % (wt.) rubidium provided the required cesium vapor pressure and the plasma thermal conductivity. It was shown that the mass of the alloy with cesium played an important role in the discharge transition from unsaturated to the saturated vapors. Comparison results are presented in peak intensity of the studied IR-radiation gas-discharge lamps depending on amplitude and duration of the supply voltages in the repeated pulsed mode. A technique was developed to compare energy efficiency of the discharges under study, and the spectral research was performed confirming advantages of the IR-radiation pulsed source based on the cesium-rubidium-xenon discharge by the serial gas-discharge lamps

Keywords

Pulsed discharge, cesium, mercury, rubidium, IR-radiation, vapor pressure, thermal conductivity

Received 14.10.2022

Accepted 02.11.2022

© Author(s), 2023

REFERENCES

- [1] Gavrish S.V., Loginov V.V., Puchnina S.V. Pulsed gas-discharge IR-radiation sources for optical-electronic systems (a review). *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2018, vol. 6, no. 4, pp. 333–348 (in Russ.).
- [2] Gavrish S.V., Kobzar A.I. Pulsed gas discharge as a source of optical interference in infra-red region. *Elektronnye informatsionnye sistemy* [Electronic Information Systems], 2019, no. 2, pp. 43–60 (in Russ.).
- [3] Gavrish S.V., Gaydukov E.N., Konstantinov B.A., et al. Discharge infra-red light sources for special applications. *Svetotekhnika*, 1998, no. 3, pp. 22–24 (in Russ.).
- [4] Loginov V.V. Researching of pulse periodic discharge in alkali metals vapors. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2019, no. 4, pp. 24–28 (in Russ.).
- [5] Gavrish S.V. Influence of plasma dynamics of a sodium discharge on the radiation spectrum. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2011, no. 3, pp. 67–72 (in Russ.).
- [6] Otani K. Pulsed alkali metal vapor discharge lamp with ceramics outer envelope. Patent US 487031. Appl. 14.04.1988, publ. 26.09.1989.
- [7] Rokhlin G.N. Razryadnye istochniki sveta [Discharge light sources.]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991.
- [8] Klyucharev A.N., Yanson M.L. Elementarnye protsessy v plazme shchelochnykh metallov [Elementary processes in alkali metal plasma]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988.
- [9] Gavrish S.V. The dynamics of the formation of a plasma channel after the ignition of a discharge in cesium-mercury-xenon pulsed lamps. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2021, no. 5, pp. 25–31 (in Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-5-25-31>
- [10] Gavrish S.V., Gavrilov S.A., Petrenko N.Yu. Cesium amalgam evaporation thermodynamics in gas discharge devices. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2018, vol. 6, no. 6, pp. 471–475 (in Russ.).
- [11] Petrenko N.Yu. The plasma heat conductivity calculations depending on the constructive parameters discharge devices. *OKNTPR [DIARSTP]*, 2017, no. 3, pp. 59–64 (in Russ.).
- [12] Gavrish S.V., Gradov V.M., Terentyev Yu.I. Osobennosti konstruksii i raboty lamp s sapfirovymi obolochkami. *Svetotekhnika*, 2008, no. 2, pp. 12–18 (in Russ.).
- [13] Gavrish S.V. Cesium amalgam condensation and evaporation processes at gas discharge lamps shutdown and ignition. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2018, no. 6, pp. 84–89 (in Russ.).
- [14] Gavrish S.V., Kobzar A.I., Zhmaev V.S., et al. Research of the factors defining the modulation characteristics of gas-discharge IR-sources. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2009, no. 1, pp. 53–59 (in Russ.).
- [15] Gavrish S.V., Kobzar A.I., Kugushev D.N., et al. Development of high power modulated Cs-sources of IR-radiation. *Prikladnaya fizika* [Applied Physics], 2010, no. 2, pp. 85–90.

[16] Gavrish S.V. Saturated vapor pressure above the amalgam of alkali metals in discharge lamps. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2011, vol. 52, no. 6, pp. 924–930.

DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894411060101>

Gavrish S.V. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Light Sources, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Loginov V.V. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Production Department of Light Sources, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, Moscow, 117997 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gavrish S.V., Loginov V.V. IR-radiation pulsed sources with a discharge in the alkali metal vapors mixture. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 3 (144), pp. 4–17 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-3-4-17>