

УДК 621.327.7

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РАЗРЯДА ОТ СОСТАВА ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕЙ СРЕДЫ

© 2024 г. С. В. Гавриш*

ООО «Научно–производственное предприятие “Мелитта”»,
ул. Миклухо–Маклая, д. 16/10, Москва, 117997 Россия

*E-mail: svgavr@list.ru

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 18.05.2023 г.

Принята к публикации 22.05.2023 г.

Работа посвящена изучению возможности создания экологически чистого источника излучения в среднем инфракрасном диапазоне спектра. Теоретически проанализированы химические элементы, пригодные для замены ртути в плазменном канале импульсных газоразрядных ламп. На основе математической модели выявлено влияние дополнительно вводимого компонента на давление паров цезия и теплопроводность плазмообразующей среды. В работе выполнены экспериментальные исследования, подтвердившие правомочность технического решения по замене ртути на рубидий, даны практические рекомендации по весовым соотношениям вводимых в разряд компонентов.

Ключевые слова: импульсный разряд, цезий, ртуть, рубидий, давление паров, теплопроводность, пиковая сила излучения, глубина модуляции, средний ИК диапазон спектра

DOI: 10.56304/S2079562923030156

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях развития светотехники и электроники научный интерес к изучению импульсного разряда высокого давления в парах щелочных металлов несколько не ослабевает. Данный факт обусловлен широкой сферой практического применения излучения плазмообразующей среды на основе как чистых металлов, так и их смесей между собой и со ртутью. При этом выходящий из разряда поток излучения охватывает широкий спектральный интервал длин волн от видимого до среднего инфракрасного (ИК) диапазона [1–4]. Рассмотрим несколько примеров применения импульсного разряда высокого давления с разрядом в различных плазменных средах на основе щелочных металлов. Из представленных в работах [1, 2] результатов исследований цезиевого разряда следует, что авторам удалось достичь высокой светоотдачи 60–70 лм/Вт при индексе цветопередачи $R_a = 98$. Полученный эффект достигнут применением импульсно – периодического разряда, обеспечивающего формирование плазмы с концентрацией $n_e \sim 10^{17}–10^{18} \text{ см}^{-3}$, при которой большая доля излучения выносится из излучающего канала 6P и 5D рекомбинационными континуумами атома цезия [2]. В другой работе [3] повышение индекса цветопередачи видимого излучения импульсного натриевого разряда предложено достичь введением в плазменный ка-

нал различных щелочных металлов. В публикации [4] доказано, что в диапазоне удельных энергий до 5 Дж/см³ при средней электрической нагрузке на сапфировую оболочку газоразрядного источника излучения в диапазоне от 20 до 40 Вт/см² в спектральной области поглощения (730–830 нм) активного элемента АИГ: Nd³⁺ твердотельного лазера эффективность ламповой накачки излучением импульсного разряда в парах калия, рубидия или цезия превышает в 1.2 раза в сравнении с накачкой излучением ксеноновых ламп. Перспективы использования импульсного или импульсно – периодического разряда в парах смеси цезия с ртутью в качестве источника ИК излучения подробно обоснованы в работе [5]. Таким образом, приведенный краткий литературный обзор не оставляет сомнения в актуальности проведения дальнейших исследований взаимосвязи спектральных и энергетических характеристик излучения импульсного разряда с составом плазмообразующей среды. Основное внимание в данной работе будет сосредоточено на исследованиях характеристик излучения импульсного разряда в смеси паров щелочных металлов в среднем ИК диапазоне (далее ИК диапазон) оптического спектра.

Таблица 1. Потенциалы ионизации, потенциалы возбуждения, длины волн линий атомов и энергетический баланс излучения исследуемых компонентов наполнения ламп

Характеристика	Химический элемент						Литература
	Na	K	Rb	Cs	Hg	Xe	
Атомная масса	23.0	39.1	85.5	132.9	200.6	131.3	[6]
Потенциал ионизации, эВ	5.14	4.34	4.18	3.89	10.44	12.13	[6]
Потенциалы возбуждения резонансных уровней, эВ	2.09	1.61	1.56	1.39	4.89	8.45	[7]
		1.62	1.59	1.45	6.71	9.56	
Длины волн резонансных линий, нм	589.59	769.90	794.73	894.35	253.65	146.9	[7]
	589.99	764.49	780.03	852.11	184.95	129.5	
Доля энергии в диапазонах:							[8]
200–300 нм	0.02	0.01	0.22	–	0.24		
300–400 нм	0.06	0.02	0.29	0.05	0.15		
400–770 нм	0.82	0.93	0.32	0.3	0.35	–	
более 770 нм	0.09	0.04	0.14	0.65	0.25		
Длина волны для энергетических переходов:							[9]
$n^2S \rightarrow n^2P$	1136.1	1252.3	1368.1	1358.9			
$n^2D \rightarrow n^2P$	1140.4	1243.4	1325.7	1469.5			
	818.3	1169.0	1529.0	3010.0	–	–	
	819.5	1177.2	1475.0	3612.7			
* Давление паров при температурах, Па:							[10]
25°C	$5.9 \cdot 10^{-16}$	$1.4 \cdot 10^{-9}$	$2.5 \cdot 10^{-9}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	–	–	
575°C	0.53	2.17	4.13	5.2			

Примечание: * Данные по давлению паров металлов, приведенные в табл. 1, носят качественный характер, так как в различных научных источниках наблюдается идентичная тенденция роста этого параметра при нагреве, но достигаемые значения разнятся.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОСТАВЛЕННОЙ ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как отмечалось выше, наиболее распространенным и эффективным источником излучения в среднем ИК диапазоне является импульсный разряд в парогазовой смеси цезия, ртути и ксенона [5]. В этой плазмообразующей среде цезий выполняет роль излучающего и проводящего элемента в силу наиболее низкого потенциала ионизации (табл. 1), ксенон при низком давлении (20–50 мм рт. ст.) используется в качестве пускового газа для первичного пробоя разрядного промежутка, когда все металлические добавки сконцентрированы в самой холодной точке (х.т.) лампы [7]. Ртуть в разряде является буфером и обладает следующими свойствами:

1. У паров ртути низкая теплопроводность в силу большой атомной массы (табл. 1). Это обеспечивает снижение тепловых потерь плазменным столбом и, как следствие, уменьшает температуру оболочки, что, в свою очередь, способствует ро-

сту модуляционных характеристик газоразрядной лампы [5].

2. Пары ртути при рабочих температурах не взаимодействуют с материалами разрядного объема [5, 7].

3. Потенциалы ионизации и возбуждения атомов ртути выше аналогичных характеристик атомов щелочных металлов (табл. 1), что позволяет вводить эти излучающие добавки при низких давлениях.

4. Пары ртути имеют низкое давление (P_{Hg}) при комнатной температуре (0.17 Па), а при рабочих температурах лампы P_{Hg} может достигать свыше 10 МПа [6]. Такое свойство ртути способствует устойчивому зажиганию разряда в атмосфере пускового газа (ксенона) и позволяет регулировать давление буфера в широких пределах значений.

5. Наличие ртути в составе плазмообразующей среды способствует значительному уширению линий излучающих добавок, что приводит к росту энергетического выхода их излучения. Наиболее

подробно данное явление изучено в случае натриевого разряда высокого давления [7].

К существенным недостаткам ртути следует отнести ее токсичность и экологическую опасность, поэтому на протяжении нескольких десятилетий этому буферу исследователи ищут достойную альтернативу по физическим и химическим свойствам [1–3, 7].

Как отмечалось, наибольшее распространение в качестве эффективной излучающей плазмобразующей среды в ближнем и среднем ИК диапазонах получили пары цезия, имеющие значительную долю излучения в диапазоне длин волн выше 770 нм (табл. 1). Выясним основные причины данного явления.

Во-первых, хорошо известно [5], что основной вклад в энергию излучения континуума ИК диапазона вносят механизмы рассеяния электронов на атомах и ионах. Учитывая тот факт, что масса атома у цезия достаточно велика, а потенциал ионизации у него самый низкий из всего ряда химических элементов, представленных в табл. 1, то можно утверждать, что в этом основная причина высокой эффективности излучения в среднем ИК диапазоне в сравнении с другими щелочными металлами.

Во-вторых, если изучить схему энергетических уровней атомов щелочных металлов [5], то можно увидеть в излучении атомов цезия наличие интенсивных линий с длиной волны 3.01 и 3.6 мкм, обусловленных энергетическими переходами $n^2D \rightarrow n^2P$ (табл. 1).

В-третьих, если сопоставить величины давления паров всех щелочных металлов (табл. 1), то становится очевидным факт, что наибольшим давлением при фиксированной рабочей температуре холодной точки газоразрядной лампы обладают пары цезия ($P_{Cs} = 5.2$ Па при 575°C). Отсюда следует важное заключение, что механизмы тормозного излучения будут более эффективны в плазмобразующей среде на основе этого металла, так как при одной и той же рабочей температуре концентрация атомов и ионов в парах цезия выше, чем это наблюдается в случае других щелочных металлов.

В итоге можно заключить, что для реализации поставленной цели необходимо сохранить цезий в качестве основного излучающего элемента плазмобразующей среды, но заменить ртуть на более экологически безопасный металл, например калий или рубидий. При этом необходимо провести серию расчетных и экспериментальных работ, направленных на уточнение влияния изменения состава плазмобразующей среды на теплофизические свойства разряда, спектральные и энергетические характеристики излучения газоразрядной лампы. Важно отметить, что на протяжении дальнейшего изложения все полученные новые данные будут сравниваться с характеристиками цезий–ртуть–ксенонового разряда.

2. РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В теоретической части данной публикации давление паров рассматривалось над индивидуальными веществами (табл. 1), в то время как в газоразрядной лампе вводимые металлы образуют сплавы и давление компонентов каждого элемента зависит от процентного соотношения в сплаве, температуры холодной точки, конструктивных характеристик разрядного объема и т.д. Поэтому необходимо проанализировать: влияние состава сплава на давление паров цезия и теплопроводность образующейся парогазовой смеси, в свою очередь, определяющую температуру оболочки газоразрядной лампы.

В данной работе для проведения расчетных исследований давлений паров компонентов над сплавами использованы математические модели, предложенные в работах [11, 12]. Особенностью применяемой системы уравнений является учет весов и процентного содержания компонентов в исходном сплаве, температуры и объемов разрядного промежутка и заэлектродной области газоразрядной лампы.

Как уже отмечалось, вторым фактором, определяющим теплофизическое состояние плазменного канала, является теплопроводность образующейся при работе лампы парогазовой смеси. В расчетах указанного параметра в зависимости от весового соотношения компонентов наполнения была использована система уравнений, подробно рассмотренная в работе [13].

Реализация математических моделей осуществлялась для следующих конструктивных характеристик импульсных газоразрядных ламп:

- межэлектродное расстояние 35 мм,
- диаметр разрядного канала 11 мм,
- давление пускового газа ксенона в холодном состоянии лампы составляло 50 мм рт. ст.,
- масса сплава равнялась 10 мг,
- состав плазмобразующей среды варьировался в широких пределах концентраций составляющих сплав компонентов.

Вычисления проводились в несколько этапов. Сначала нами проведена расчетная оценка влияния на давление паров и теплопроводность замены ртути в составе плазмобразующей Cs-Hg-Xe смеси на калий или рубидий. Натрий нами не рассматривался, так как по данным работ [3, 7] значительная доля энергии излучения сосредоточена в резонансном дуплете 589.59 и 589.99 нм (табл. 1), а в силу его малой атомной массы становится понятно, что теплопроводность смеси будет значительно выше, чем у других щелочных металлов.

На рис. 1 представлены полученные расчетные данные, из анализа которых можно сделать следующие заключения:

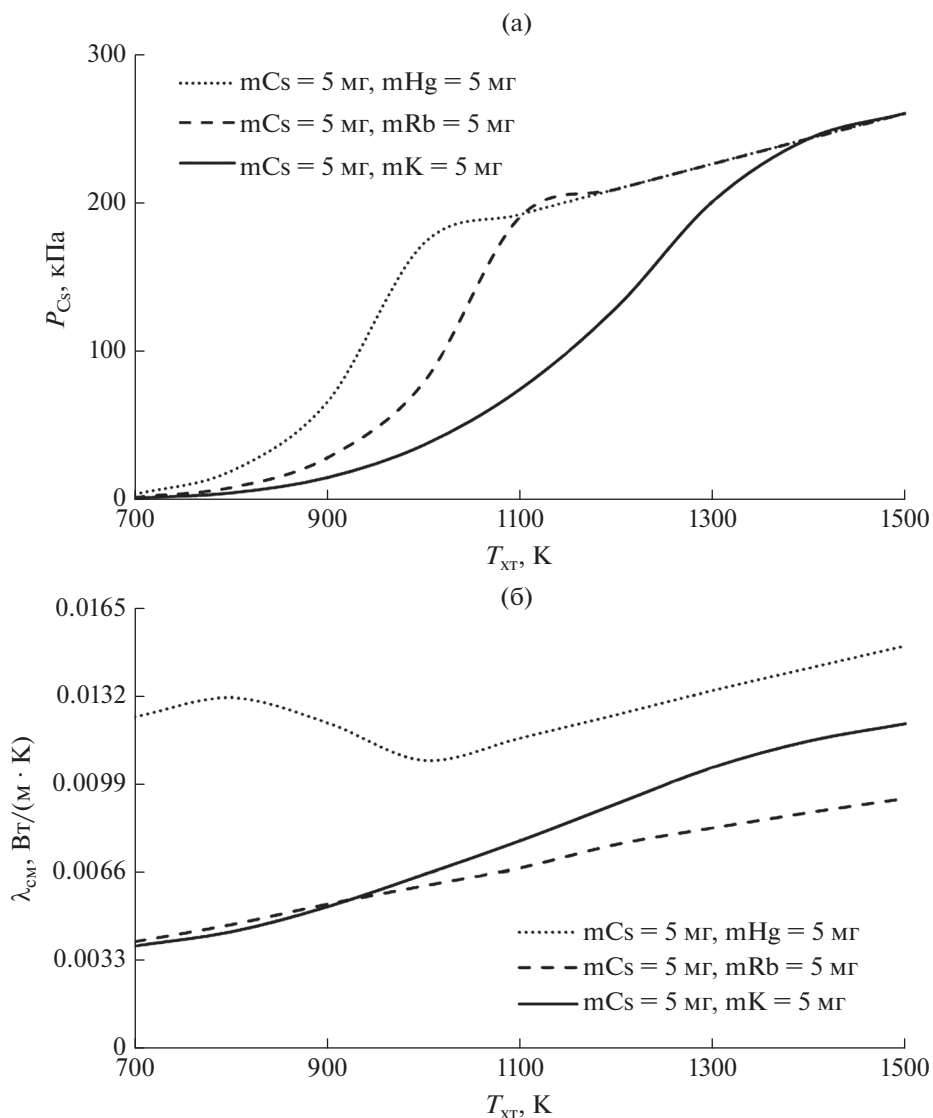


Рис. 1. Зависимость давления паров цезия (а) и теплопроводности (б) его смесей с другими металлами от температуры холодной точки лампы.

- С ростом температуры холодной точки $T_{хт}$ возрастает давление паров цезия над сплавом (рис. 1а). При этом представленная зависимость носит не монотонный характер. Для всех рассматриваемых сплавов P_{Cs} повышается по экспоненциальному закону, достигая характерной точки перехода разряда в ненасыщенных парах в насыщенное состояние. Далее рассматриваемая зависимость $P_{Cs} = f(T_{хт})$ приобретает линейный характер. При этом указанная характерная точка для каждого сплава имеет свою температуру этого перехода. Наблюдаемое явление связано с тем, что при подготовке сплава нами применялись массовые доли веществ, в то время как, согласно закону Рауля, давление паров над соединением определяется мольной долей каждого компонента.

- Давление паров цезия над сплавом с рубидием при рабочей температуре холодной точки лампы 1100 К совпадают с P_{Cs} для амальгамного соединения. Данный результат позволяет сделать вывод, что замена ртути на рубидий в лампе не скажется на интенсивности излучения атомов цезия в ИК диапазоне.

- Температурная зависимость теплопроводности с различным составом компонентов (рис. 1б) позволяет сделать вывод, что при разряде в смеси паров цезия с рубидием тепловые потери плазмы на оболочку, ограничивающую разряд, ниже, чем у цезий-ртутной лампы.

- Сопоставление всех графиков на рис. 1 позволяет сделать вывод, что из дальнейших иссле-

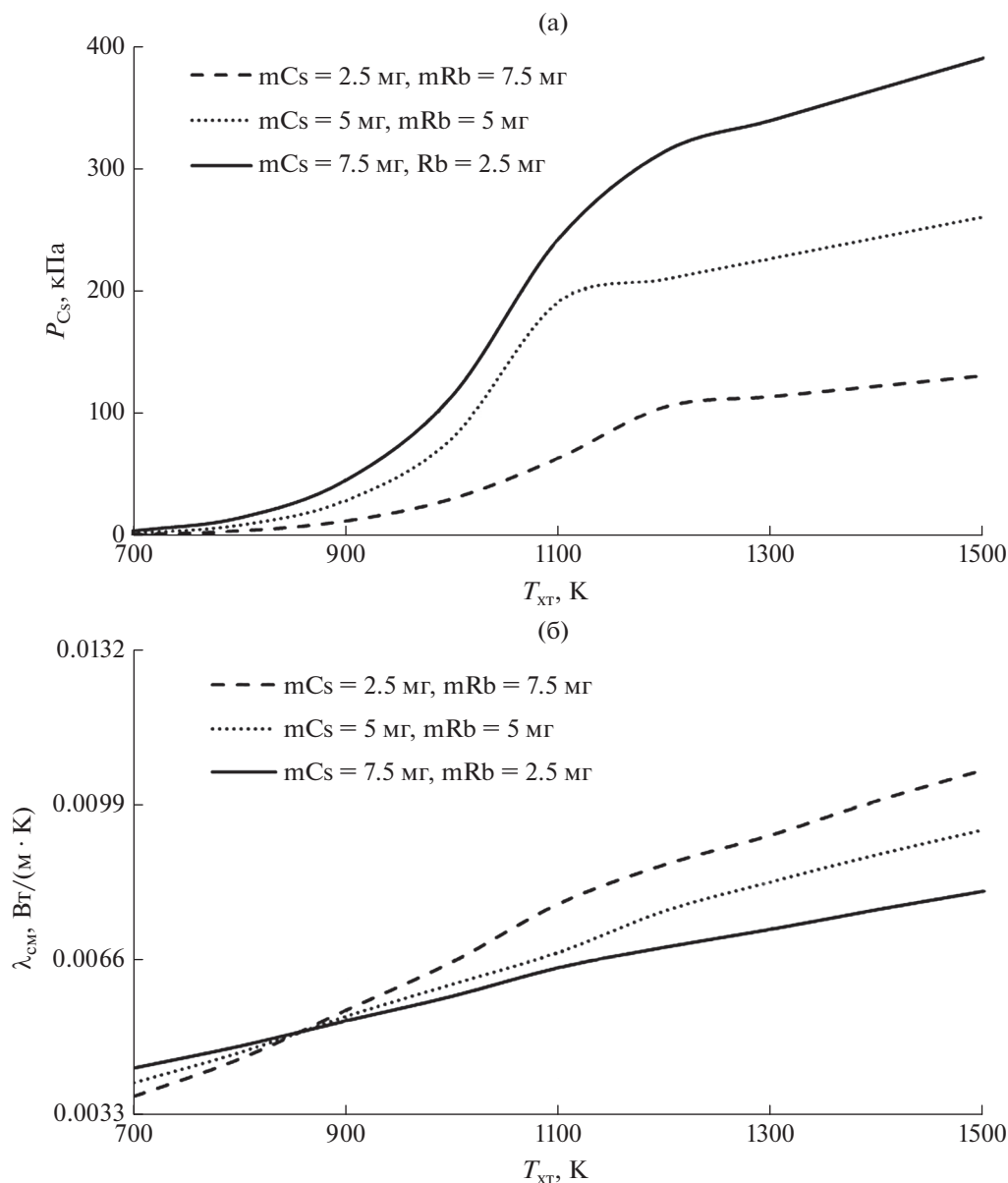


Рис. 2. Зависимость давления (а) и теплопроводности (б) паров цезия над сплавом с рубидием от температуры холодной точки лампы.

дований разряд в парах смеси цезия с калием можно исключить.

Второй этап расчетных исследований был посвящен установлению влияния на давление паров цезия и теплопроводность плазмообразующей среды весового содержания рубидия в его сплаве с цезием. Начальные условия моделирования остались прежними, варьируемой величиной при расчетах было весовое отношение Cs : Rb при постоянной массе сплава 10 мг.

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рис. 2. Из приведенных данных видно, что при уменьшении концентрации

рубидия до 25 вес. % давление паров увеличивается с ростом температуры холодной точки лампы. В свою очередь, теплопроводность образующейся в разряде парогазовой смеси снижается с уменьшением весового содержания рубидия в исходном сплаве.

Таким образом, из анализа всех расчетных результатов можно сделать предположение, что для успешной реализации поставленной задачи, направленной создание экологически чистого и эффективного источника ИК-излучения, необходимо заменить ртутный буфер на рубидий при его содержании в сплаве менее 25 вес. %. Дальнейшее

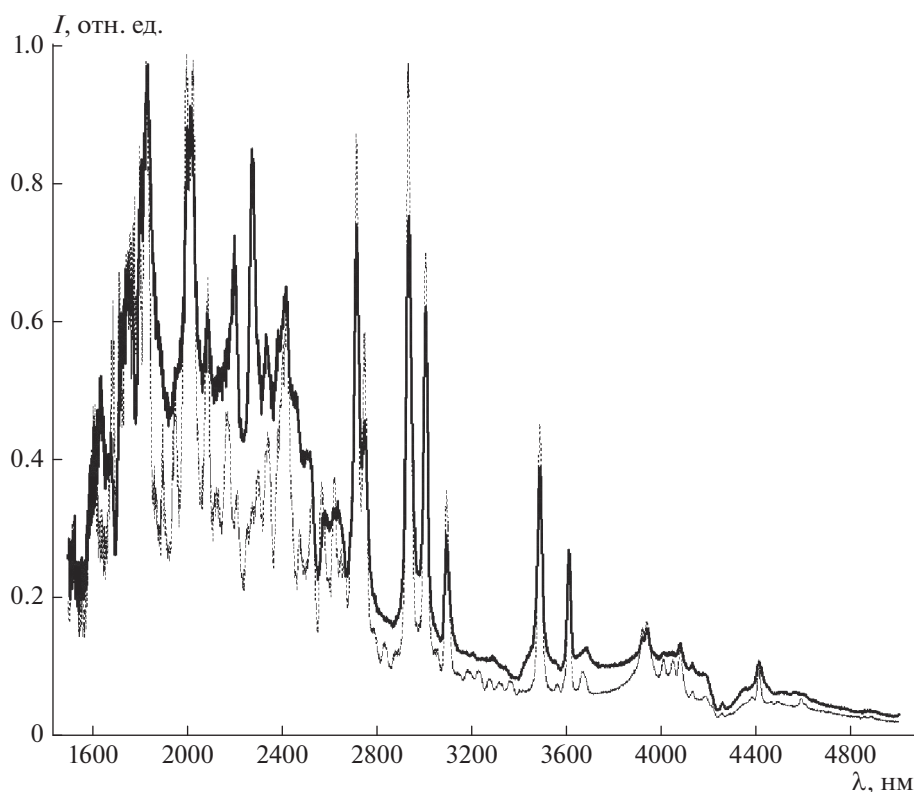


Рис. 3. Спектральное распределение излучения разряда в смесях паров цезия с рубидием (сплошная линия) и цезия со ртутью (пунктирная линия).

уменьшение концентрации рубидия в составе наполнения лампы не представляется возможным в силу технологических трудностей получения соединения Cs–Rb.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАСЧЕТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью данного раздела является исследование спектральных и энергетических характеристик цезий–рубидиевого разряда в среднем ИК-диапазоне, сопоставление полученных результатов с аналогичными параметрами у Cs–Hg газоразрядной лампы и данными вычислительного эксперимента. Для проведения серии экспериментов были изготовлены импульсные газоразрядные лампы с двумя сапфировыми оболочками [5] с диаметром и длиной плазменного канала 11 мм и 35 мм, соответственно. В качестве наполнения экспериментальных источников ИК-излучения использовались сплавы 7.5 мг Cs – 2.5 мг Rb и 7.5 мг Cs – 2.5 мг Hg. Давление пускового газа (ксенон) во всех исследуемых образцах равнялось 70 мм рт. ст. Используемый источник электрического питания ламп и регистрирующая аппаратура подробно описаны в работе [14].

3.1. Спектральные и энергетические исследования излучения ламп

Метрология излучения в среднем ИК-диапазоне спектра достаточно сложна и ограничена в аппаратном обеспечении. По этой причине нами разработаны некоторые оригинальные методики, позволяющие оценить преимущества или недостатки разрядов с различным составом плазмообразующих сред и сопоставить полученные результаты между собой.

Особенность спектральных исследований заключалась в постоянстве всех параметров как спектрометра МДР-206 (ширина входной и выходной щелей, напряжение питания фотоприемного устройства и т.д.), так и режимов электрического питания каждой исследуемой лампы (удельная электрическая мощность 430 Вт/см, частота следования импульсов тока 425 Гц и т.д.). В таких условиях измерений наложение спектров излучения различных разрядов друг на друга позволяет сделать заключение о преимуществах энергетических характеристик одного из них. В качестве примера на рис. 3 представлено спектральное распределение излучения цезий–рубидиевого (сплошная линия) и цезий–ртутного (пунктирная линия) разрядов. Как следует из представленных результатов, площадь, ограниченная кривой спектраль-

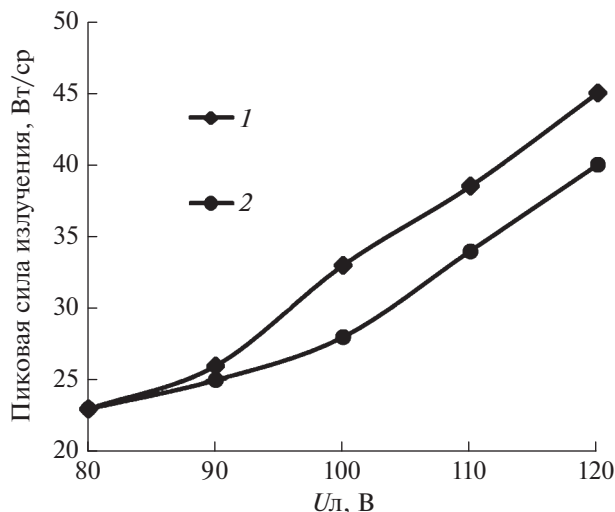


Рис. 4. Зависимость пиковой силы излучения в среднем ИК диапазоне от напряжения на лампе с цезий-рубидиевым (1) и цезий-ртутным наполнением (2).

ного распределения излучения плазмообразующей среды на основе паров цезия с рубидием значительно больше, чем это наблюдается в случае цезий-ртутного разряда. Данный факт позволяет говорить о преимуществах замены ртути на рубидий. Одновременно следует отметить, что глубина самообращения спектральной линии 3.01 мкм больше в случае цезий-ртутного разряда, что свидетельствует о более высоком давлении паров в этой плазмообразующей среде при температуре $T_{\text{хт}}$ менее 1100 К, что подтверждает расчетные данные на рис. 1а.

С целью дополнительной оценки результатов расчетных исследований нами проведено изучение влияния электрической мощности газоразрядной лампы $P_{\text{л}}$ на пиковую силу излучения в среднем ИК-диапазоне для цезий-ртутного и цезий-рубидиевого разрядов. Повышение $P_{\text{л}}$ осуществлялось посредством увеличения амплитуды импульса напряжения $U_{\text{л}}$ при постоянстве длительности и частоты следования импульсов. В качестве фотоприемного устройства использован фотодиод ФД-119 с областью спектральной чувствительности в диапазоне длин волн 2–5 мкм. Полученные результаты представлены на рис. 4, из которых следует, что увеличение напряжения (мощности) на лампе приводит к практически линейному росту пиковой силы излучения A в среднем ИК-диапазоне спектра. Исключение составляет область малых значений $U_{\text{л}}$, в которой величины A обоих разрядов близки друг к другу. Данное явление связано с малым давлением плазмообразующей среды, когда тормозной механизм не играет существенной роли в процессах генерации излучения. Из представленных на рис. 4 дан-

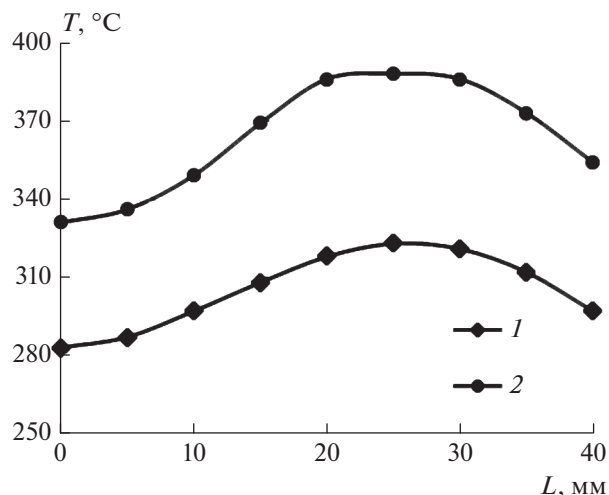


Рис. 5. Продольное распределение температуры оболочки лампы с цезий-ртутным (1) и цезий-рубидиевым (2) наполнением.

ных можно увидеть некоторый выигрыш в эффективности разряда в смеси паров цезия с рубидием. Для дальнейшего увеличения пиковой силы излучения Cs–Rb лампы необходимо провести оптимизацию конструкции разрядного объема и ее режимов электрического питания. Тем не менее, уже сейчас понятно, что рассматриваемое техническое решение является перспективным.

3.2. Температурный профиль оболочки лампы

Как отмечалось в теоретическом разделе, увеличение теплопроводности плазмообразующей среды неизбежно приведет к повышению температуры оболочки и, как следствие, к снижению модуляционных характеристик лампы из-за возрастания мощности непрерывного излучения нагретой колбы, ограничивающей разряд. Исследование радиального распределения температуры плазменного столба различных сред является сложной задачей, требующей привлечения большого массива математических вычислений. В то же время, теплопроводность и поглощение излучения материалом оболочки способствуют повышению стенки колбы газоразрядной лампы. Учитывая, что спектральный состав излучения близок у обеих исследуемых ламп (рис. 3), то можно качественно сопоставить потери энергии теплопроводностью.

Исследование температурного профиля разрядной оболочки лампы проводилось по тепло-визионной методике, подробно изложенной в работе [15]. На рис. 5 представлено продольное распределение температуры наружной поверхности колбы для цезий-рубидиевого и цезий-ртутного разрядов при удельной электрической мощности 430 Вт/см. Как следует из представленных графика-

ческих результатов, у Cs–Rb лампы температура на всей длине разрядного промежутка на 50–60°C выше, чем в случае Cs–Hg разряда. Оценка влияния выявленного роста температуры оболочки на глубину модуляции показывает, что данный параметр снижается на 0.25%, что существенно не скажется на эксплуатационных характеристиках газоразрядной лампы в составе оптико-электронной системы [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного теоретического анализа, проведенных расчетных и экспериментальных исследований установлено, что для создания эффективного источника в среднем ИК-диапазоне спектра в качестве основного компонента плазмообразующей среды необходимо использовать пары цезия. С целью обеспечения экологической безопасности газоразрядной лампы представляется перспективным произвести замену ртутного буфера на пары рубидия. При этом весовое содержание рубидия в его сплаве с цезием не должно превышать 25%. При соблюдении перечисленных рекомендаций эксплуатационные характеристики предложенной лампы не уступают освоенному в серийном производстве источнику ИК излучения на основе разряда в парах цезия и ртути.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Богданов А.А. и др. // Прикладная физика. 2022. № 6. С. 94–107.
2. Богданов А.А. и др. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 16–21.
3. Гавриш С.В. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 67–72.
4. Гайдуков Е.Н. и др. // Электронная техника. Сер.: Лазерная техника и оптоэлектроника. 1985. Т. 4 (35). С. 34–38.
5. Гавриш С.В. и др. // Светотехника. 1998. №. 3. С. 22–24.
6. Григорьев И.Е., Мейлихов Е.З. Физические величины: Справочник. 1991. Москва: Энергоатомиздат.
7. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. 1991. Москва: Энергоатомиздат.
8. Сарычев Г.С. // Светотехника. 1970. № 1. С. 15–16.
9. Ключарев А.Н., Янсон М.Л. Элементарные процессы в плазме щелочных металлов. 1988. Москва: Энергоатомиздат.
10. Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов. 1961. Москва: Изд-во АН СССР.
11. Гавриш С.В. // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52 (6). С. 92–99.
12. Гаврилов С.А., Гавриш С.В., Петренко Н.Ю. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6 (6). С. 471–475.
13. Петренко Н.Ю. // Оборонный комплекс России — научно-техническому прогрессу. 2014. № 1. С. 49–55.
14. Гавриш С.В. // Ядерная физика и инжиниринг. 2022. Т. 13 (5). С. 482–488. [Gavrish S.V. // Phys. At. Nucl. 2022 V. 85 (9). P. 1574–1579].
15. Гавриш С.В. и др. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8 (4). С. 251–264.

Dependence of the Radiation Characteristics of a Pulsed Discharge on the Composition of the Plasma-Forming Medium

S. V. Gavrish*

Scientific and Industrial Enterprise “Melitta” Ltd., Moscow, 117977 Russia

*e-mail: svgavr@list.ru

Received May 15, 2023; revised May 18, 2023; accepted May 22, 2023

Abstract—The article is devoted to the study of the possibility of creating an environmentally friendly source of radiation in the mid-infrared range of the spectrum. Theoretically analyzed are chemical elements suitable for replacing mercury in the pulsed gas-discharge lamps plasma channel. Based on a mathematical model, the effect of an additionally introduced component on the cesium vapor pressure and the plasma-forming medium thermal conductivity was revealed. In the paper, experimental studies were carried out, which confirmed the technical solution validity for replacing mercury with rubidium, and practical recommendations were given on the weight ratios of the components introduced into the discharge.

Keywords: pulsed discharge, cesium, mercury, rubidium, vapor pressure, thermal conductivity, peak radiation intensity, modulation depth, mid-IR range of the spectrum