

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 621.327.7

ВЛИЯНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ ЦЕЗИЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. С. В. Гавриш*

ООО «Научно-производственное предприятие «Мелитта», Москва, 117997 Россия

*E-mail: svgavr@list.ru

Поступила в редакцию 13.05.2022 г.

После доработки 13.05.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Работа посвящена изучению формирования сильноточной стадии импульсного разряда в парах цезия из непрерывно горящего вспомогательного плазменного канала. Проведено сопоставление электрофизических параметров и характеристик излучения импульсного разряда при наличии и отсутствии вспомогательного разряда. Даны рекомендации по выбору параметров источника электрического питания вспомогательного разряда для обеспечения стабильности импульсов излучения в импульсно – периодической структуре выходных сигналов оптико – электронных систем.

Ключевые слова: импульсный разряд, цезий, вспомогательный разряд, пиковая сила излучения, длительность импульса, глубина модуляции, средний ИК-диапазон спектра

DOI: 10.56304/S2079562922030149

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многолетние исследования импульсного разряда в парах цезия высокого давления привели к созданию нового поколения модулируемых источников инфракрасного (ИК) излучения (газоразрядных ламп) с двумя сапфировыми оболочками для оптико – электронных систем (ОЭС) специального назначения [1]. Основными эксплуатационными характеристиками указанных газоразрядных ламп являются три взаимозависимых параметра: пиковая сила A , глубина модуляции m и длительность $t_{0.5}$ по уровню 0.5 импульса излучения [1]. Понятно, что для обеспечения высоких значений A и m требуется поступление энергии в цезиевый разряд за минимально возможное время. Одновременно, эксплуатационные требования, предъявляемые к ОЭС, заключаются в необходимости формирования импульсно – периодической структуры ИК излучения с максимально возможной длительностью вспышки $t_{0.5}$. Поэтому при создании цезиевых модулируемых источников ИК излучения встает задача получить компромисс между величинами A , m и $t_{0.5}$. Во-первых, все перечисленные параметры определяются как конструктивными характеристиками (диаметр и длина плазменного канала, состав наполнения, толщина стенки сапфировой оболочки и т.д.), так и теплофизическим состоянием цезиевой плазмообразующей среды

(осевая температура, продольный и радиальный тепловой профиль разряда, теплопроводность рабочей смеси и т.д.) [2]. Во-вторых, характеристики излучения газоразрядных импульсных ламп существенно зависят от режимов электрического питания. Пиковая сила и длительность вспышки, частота следования импульсов, яркость разряда и спектральный состав излучения обусловлены параметрами питающих устройств: емкостью рабочего конденсатора и напряжением на нем, индуктивностью разрядного контура, наличием вспомогательного разряда (дежурной дуги) и т.д. [3]. В итоге, вопрос изучения влияния параметров разрядного контура при непрерывно горящей дежурной дуге на формирование плазменного канала, обеспечивающего в течение вспышки требуемые характеристики импульса ИК излучения, является актуальной задачей. Частичному решению описанных проблем посвящена данная публикация.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАМПЫ В РАЗРЯДНОМ КОНТУРЕ С ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ РАЗРЯДОМ

Наиболее обстоятельно вопрос функционирования газоразрядных источников излучения в электрической цепи рассмотрен в монографии [4], где основное внимание уделено импульсным ксеноновым лампам. Разряд в парах щелочных

металлов представляет более многофакторное состояние плазмы, но основные закономерности влияния параметров разрядного контура на свойства ксеноновой плазмы могут быть использованы применительно к импульсным цезиевым лампам.

Актуальность использования вспомогательного разряда в импульсных источниках ИК излучения обусловлена важной особенностью работы оптико – электронной системы (ОЭС) специального назначения [1, 2]. Требования функционального назначения ОЭС ставят задачу формирования импульсно – периодической структуры излучения ламп, т.е. в промежутке между серией силовых импульсов тока необходимо обеспечить паузу длительностью в несколько сотен миллисекунд. Понятно, что в такой ситуации в плазменном канале сразу после отключения питающих напряжений происходит полная деионизация разрядного промежутка лампы. В результате, чтобы снова сформировать сильноточный плазменный канал для новой серии импульсов тока потребуются выполнить импульсный пробой межэлектродного промежутка. В условиях импульсного разряда в парах цезия, ограниченного системой двух сапфировых оболочек, техническая реализация такой задачи проблематична в силу нескольких причин, подробно рассмотренных автором в работах [5].

В итоге становится понятным, что в паузах между сериями силовых импульсов тока, требуется поддержание проводящего состояния разрядного промежутка импульсной цезиевой лампы. При этом интенсивность излучения вспомогательного разряда должна быть минимальной. Единственным техническим решением в обозначенной ситуации является обеспечение непрерывного горения слаботочного вспомогательного разряда между серией импульсов. При этом возможны два варианта дежурной дуги. Во-первых, подключение источника электрического питания вспомогательного разряда должно осуществляться между сериями импульсов тока. Во-вторых, формирование сильноточной стадии разряда происходит в постоянно горящем слаботочном плазменном канале. В данной работе в силу причин, рассмотренных ниже, нами используется второй тип вспомогательного разряда, позволяющий обеспечить импульсно – периодическую структуру излучения с переменной амплитудой и длительностью оптических сигналов ОЭС.

Информация об использовании дежурной дуги для стабилизации разрядов в парах металлов весьма ограничена [6–8], из которой можно выделить только следующие два факта:

- при отсутствии дежурной дуги за время прохождения импульсов тока через лампу осевое распределение импеданса близко к равномерному, а во время пауз основная часть локализуется вбли-

зи электродов, уменьшается площадь охвата их и, следовательно, возрастает распыление. Использование дежурной дуги уменьшает импеданс на электродах [8];

- поддержание постоянного тока в интервалах между импульсами дает возможность легко управлять давлением щелочных металлов и контролировать параметры источника излучения, так как напряженность электрического поля дежурной дуги пропорциональна корню квадратному из давления паров добавок [6]. Других данных по работе импульсных цезиевых ламп при наличии вспомогательного разряда в научной литературе нами не обнаружено.

Как уже отмечалось, значительная часть научных исследований была посвящена изучению влияния вспомогательного разряда на свойства ограниченной кварцевой оболочкой плазмы инертных газов. Например, установлено, что при работе ксеноновых и криптоновых ламп на повышенной частоте следования токовых импульсов (400–800 Гц) излучение характеризуется временной и амплитудной нестабильностью [9, 10]. Для устранения этого недостатка в работе [9] предлагается использовать режим дежурной дуги, который помимо улучшения воспроизводимости импульсов излучения устраняет возможность пропусков в последовательности импульсов тока и, как следствие, погасание разряда. Проведенные другими авторами [11] исследования позволили дополнительно определить следующие преимущества работы лампы при наличии вспомогательного разряда, а именно:

- повышается амплитуда и уменьшается длительность импульса излучения;

- возрастает долговечность газоразрядной лампы за счет исключения из разрядного контура источника высоковольтного поджигающего импульса, что приводит к уменьшению налетов продуктов распыления электродов на оболочке;

- появляется возможность повышения выходной мощности излучения при работе с малыми удельными энергиями, поскольку уменьшаются потери на энергию ионизации разрядного промежутка при зажигании лампы.

В итоге оказывается, что формирование сильноточного разряда в непрерывно горящем канале дежурной дуги энергетически выгодно и одновременно увеличивает срок службы импульсной цезиевой лампы. В то же время остается открытым вопрос о влиянии такого способа формирования плазменного канала на основные характеристики ИК излучения (A , m и $t_{0,5}$) рассматриваемой газоразрядной лампы.

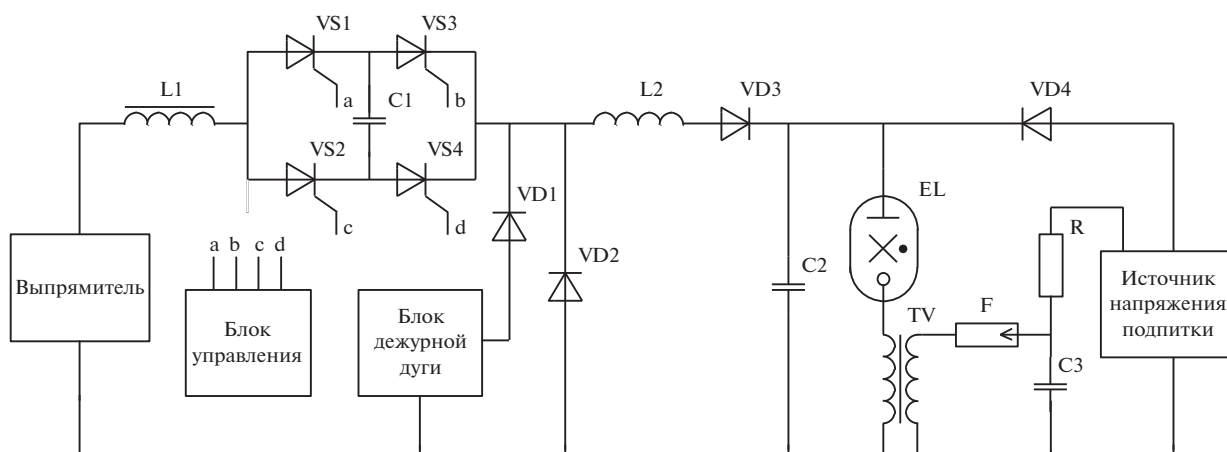


Рис. 1. Блок-схема источника электрического питания исследуемой импульсной цезиевой лампы с двумя сапфировой оболочками. EL – сапфировая лампа, R – зарядное сопротивление, C1 – промежуточный конденсатор, C2 – разрядный конденсатор, C3 – блокировочный конденсатор, VD1 – VD4 – диоды, L1 – дроссель НЧ, L2 – дроссель, VS1...VS4 – тиристоры, TV – импульсный трансформатор, F – разрядник.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сомнения в целесообразности применения вспомогательного режима связаны с тем, что наличие постоянно горящего канала между сильноточными импульсами будет способствовать возрастанию немодулируемого фонового ИК излучения лампы A_n , что неизбежно приведет к падению глубины модуляции m . Поэтому потребовались сравнительные испытания режимов работы импульсной цезиевой лампы с дежурной дугой и без нее.

2.1. Аппаратное обеспечение эксперимента

Для проведения экспериментальных исследований нами разработан универсальный источник электрического питания (рис. 1) импульсных цезиевых ламп, в состав которого вошли трансформатор с плавной регулировкой выходного напряжения на мощном выпрямителе, схема управления импульсным разрядом лампы, включающая модуль управления и тиристорный коммутатор (VS1–VS4) с рабочим конденсатором C2, блок дежурной дуги, источник напряжения подпитки для зажигания ламп по пленке цезия и устройство высоковольтного поджига (TV, F). С целью точного определения электрофизических характеристик параллельно испытуемой лампе подключался делитель напряжения, а последовательно устанавливался безиндуктивный шунт, что позволило нам контролировать осциллограммы подаваемого напряжения и тока, проходящего через лампу. Эти данные в реальном масштабе времени вводились в компьютер для проведения расчетов средней и мгновенной мощности, потребляемой лампой. За параметрами всех входящих в источник

питания блоков осуществлялся приборный контроль.

Экспериментальный источник электрического питания обеспечивал следующие характеристики:

- потребляемая мощность до 5 кВт;
- частота следования импульсов обеспечивалась 400, 450 и 500 Гц с возможностью подключения внешнего задающего генератора;
- регулируемое напряжение на рабочем конденсаторе от 0 до 560 В;
- емкость рабочих конденсаторов в пределах от 2 до 158 мкФ;
- индуктивность разрядного контура от 28.5 до 158 мкГн;
- стабилизированный ток дежурной дуги в пределах 0.8–2.5 А;
- напряжение подпитки в диапазоне от 0 до 1.8 кВ;
- импульсное зажигание с амплитудой 1-й полуволны не менее 8 кВ и частотой следования импульсов 5–10 Гц.

Принцип измерения характеристик излучения в среднем ИК диапазоне основан на измерении электрического сигнала на выходе фотодиода ФД-119 со спектральной чувствительностью в диапазоне 2.0–5.0 мкм, расчете силы излучения (при условии соблюдения “точности” источника) с учетом спектральных характеристик образцового и измеряемого источников, пересчете средних значений измеряемых величин в пиковые значения силы излучения и расчете коэффициентов глубины модуляции [1].

Таблица 1. Зависимость времени достижения максимального напряжения дежурной дуги $U_{д.д.макс}$ от наполнения лампы и напряжения питающей сети U_c

№ п/п	Наполнение	$t_{макс}$, мс	$U_{д.д.макс}$ при U_c , В	
			200	208
1.	12 мг Cs + 170 мм рт. ст. Xe	1.0	240	260
2.	12 мг Cs + 3 мг Hg + 50 мм рт. ст. Xe	0.7	260	290
3.	6 мг Cs + 170 мм рт. ст. Xe	2.0	150	150

2.2. Полученные результаты и их анализ

Возможность работы лампы без дежурной дуги определяется, в первую очередь, условиями эксплуатации (частота и длительность импульсов тока, наличие пауз и т.д.). Проведенные экспериментальные исследования показали, что в случае непрерывного режима работы со средней частотой 400–500 Гц, с заданными параметрами импульса излучения ($t_{0.5} = 130$ мкс) колоколообразной формы при мощности 2–2.5 кВт и энергии разряда 4–5 Дж возможна работа цезиевой лампы с двумя оболочками без дежурной дуги. При этом такой режим работы имеет следующие преимущества:

- глубина модуляции излучения лампы в среднем ИК диапазоне больше на величину 0.3–0.5%, чем при работе с дугой в тех же режимах;

- снижаются весогабаритные характеристики блока питания и энергопотребление на 0.2–0.3 кВт.

На рис. 2 приведены осциллограммы напряжения, тока, излучения и полученное расчетным путем изменение сопротивления разряда при работе лампы с дежурной дугой и без нее.

Из осциллограмм импульсов напряжения (рис. 2а) видно, что для ионизации разрядного промежутка необходимо приложить напряжение U_1 в 1.5 раза больше, чем в случае с дежурной дугой U_2 . Такой эффект объясняется необходимостью поступления большей энергии в разряд для достижения рабочей температуры плазмообразующей среды. По этой причине наблюдается временной сдвиг начала форсированной ионизации (роста тока) и, соответственно, импульса излучения (рис. 2г). При этом токовые импульсы по амплитуде, длительности, скорости нарастания и спада фронтов одинаковы в обоих случаях.

В то же время для излучения в среднем ИК диапазоне (рис. 2г) наблюдается время нарастания импульса короче на 15 мкс, а спада длиннее на 70 мкс при использовании дежурной дуги. Это объясняется более быстрым ростом температуры плазмы, предварительно подогретой дежурной дугой, которая, в свою очередь, препятствует температурной релаксации в случае спада импульса излучения. Это хорошо видно по изменению сопротивления разряда R , приведенного на рис. 2в.

В итоге получается, что импульсы излучения при работе лампы с дежурной дугой имеют большее значение длительности $t_{0.5} = 176$ мкс, чем, а в случае ее отсутствия, где $t_{0.5} = 157$ мкс (рис. 2г). Сопоставление осциллограмм импульсов тока и ИК излучения (рис. 2б и 2г) показывает их схожесть между собой как при наличии вспомогательного разряда, так и без него. Как подчеркивалось ранее, данный результат очень важен для обеспечения функциональных характеристик ОЭС. Необходимо отметить, что наблюдается задержка максимума импульса излучения по отношению к максимуму импульса тока (рис. 2б и 2г). При этом отношение времени достижения пикового значения к длительности импульса, рассчитанное в работе [12] для ксенонового разряда составляет 13.6%, а в нашем случае увеличивается до 24%. Данное явление связано с медленным повышением электронной температуры вследствие более высокой теплопроводности цезиевой плазмообразующей среды.

После прохождения импульса тока, т.е. в момент отключения разряда накопительного конденсатора, сопротивление плазмообразующей среды (рис. 2в) очень мало (около 0.2–0.5 Ом), но в промежутке между токовыми импульсами R восстанавливается до определенной величины, определяемой напряжением холостого хода и мощностью источника питания вспомогательного разряда. При этом в работе лампы с дежурной дугой можно выделить два этапа: выход в номинальный режим и стационарное горение. В каждом случае напряжение дежурной дуги ведет себя по-разному. Осциллограммы импульсов напряжения при выходе в рабочий режим и при установившемся горении отличаются временем нарастания величин, причем последний режим имеет ярко выраженный максимум $U_{д.д.макс}$. Как следует из табл. 1 на время достижения максимального напряжения дежурной дуги $t_{макс}$ после окончания разряда накопительного конденсатора до значения $U_{д.д.макс}$ влияет прежде всего наполнение лампы. Результаты исследования зависимости $t_{макс}$ от наполнения лампы 7/90 приведены в табл. 1.

Исследования лампы проводились при питании блока дежурной дуги от генератора, который позволял регулировать выходное напряжение U_c

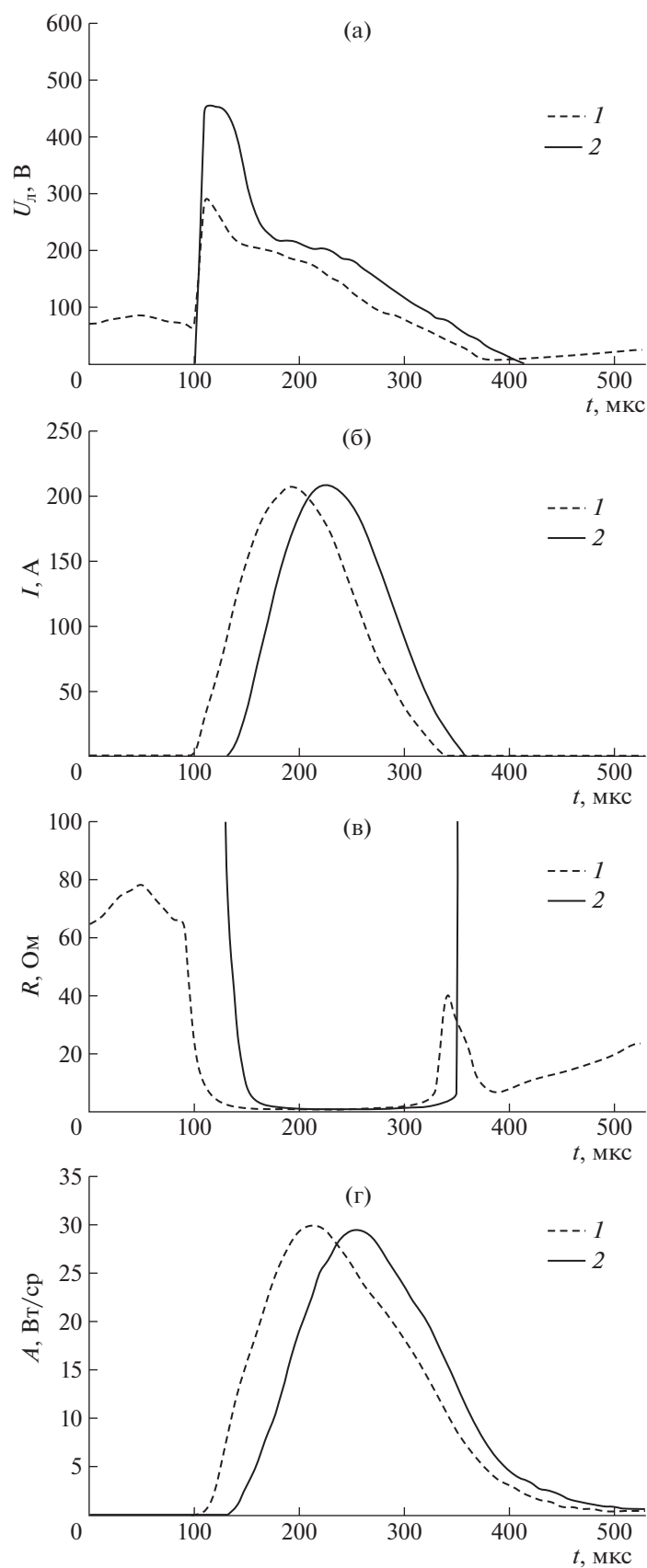


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (а), тока (б), сопротивления (в) и излучения в среднем ИК диапазоне (г) при работе цезиевой лампы с дежурной дугой (1) и без нее (2).

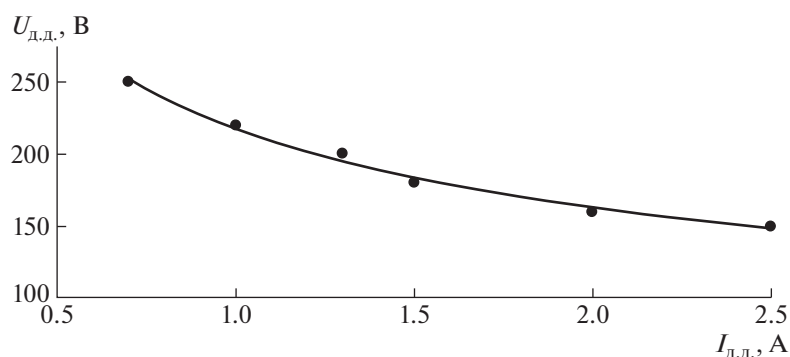


Рис. 3. Зависимость напряжения дежурной дуги от тока.

от 190 до 208 В. Как следует из табл. 1, минимальное время стабилизации напряжения дежурной дуги наблюдается у ламп с цезий – ртуть – ксеноновым наполнением. Это объясняется быстрым нарастанием температуры в центре разряда при наличии ртутного буфера. Минимальное значение $U_{д.д.макс} = 150$ В, независящее от напряжения сети, получено для ламп 7/90 с наполнением 6 мг цезия. Если принять температуру холодной точки равной $T_{х.т.} = 700^{\circ}C$, то для достижения давления насыщенных паров цезия, согласно уравнению Менделеева–Клапейрона, потребуется 9 мг. Следовательно, в этой лампе разряд происходит в насыщенных парах уже при $T = 550^{\circ}C$ и дополнительное повышение мощности дежурной дуги, при увеличении U_c , не влияет на давление паров и, соответственно, $U_{д.д.макс}$.

Величина $U_{д.д.макс}$ определяет работоспособность лампы с дежурной дугой. В случае равенства $U_{д.д.макс}$ и напряжения на накопительном конденсаторе лампа сразу гаснет [11].

В результате исследований выявлено, что напряжение $U_{д.д.макс}$ зависит от следующих факторов: напряжения питания блока дежурной дуги, давления добавок, режима охлаждения, тока дежурной дуги $I_{д.д.}$.

Давление паров щелочного металла и режимы охлаждения связаны между собой. Так как холодная точка лампы находилась за катодным узлом, то при установке газоразрядного источника излучения в “утепленную” цангу блока излучателя, происходит рост $T_{х.т.}$ и давления добавок и, как следствие, увеличивается $U_{д.д.макс}$ за счет повыше-

ния времени релаксации плазмы. Так как блок дежурной дуги является стабилизатором тока, то возможно снижение $U_{д.д.макс}$ только за счет увеличения тока дежурной дуги.

Для получения зависимости $U_{д.д.макс} = f(I_{д.д.})$ была испытана лампа 7/90 с наполнением 12 мг Cs, 3 мг Hg и 50 мм рт. ст. Хе в разрядном контуре $C = 34$ мкФ, $L = 20$ мкГн при мощности 2 кВт и частоте следования токовых импульсов 476 Гц. Как следует из рис. 3 напряжение $U_{д.д.макс}$ уменьшается от 250 до 150 В при росте тока дежурной дуги от 0.7 до 2.5 А. Уже при $I_{д.д.} = 1$ А и более исчезает амплитудная нестабильность, при этом увеличение тока дежурной дуги нежелательно, так как увеличивается интенсивность немодулируемого излучения. Это подтверждают результаты исследований той же лампы и в тех же режимах, которые сведены в табл. 2.

В табл. 2 приведены значения для качественной оценки, соответствующие показаниям осциллографа. Из приведенных данных следует, что увеличение тока с 1.0 до 2.0 А приводит к снижению глубины модуляции на 1%, при этом остальные характеристики излучения A , $t_{0.5}$ остаются неизменными. Таким образом, для обеспечения функциональных характеристик ОЭС для импульсных цезиевых источников ИК излучения мощностью до 2.5 кВт нами рекомендован ток вспомогательного разряда не превышающий 1.0 А.

Таблица 2. Зависимость излучательных характеристик лампы от тока дежурной дуги

№ п/п	$I_{д.д.}, A$	U_c, B	A, B	A_n, B	$t_{0.5}, мкс$	$U_{д.д.макс}, B$	$m, \%$
1.	1.0	200	3.92	0.28	142	250	93.3
2.	1.5	200	3.92	0.3	142	210	93.0
3.	2.0	200	3.92	0.328	140	180	92.3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретического анализа и экспериментальных исследований установлено, что развитие сильнооточной стадии разряда в парах цезия при наличии непрерывно горящего плазменного канала является энергетически выгодным способом формирования импульсно – периодической структуры излучения в средней ИК области спектра. При этом применение режима дежурной дуги дополнительно дает целый ряд положительных эффектов, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик импульсных цезиевых ламп:

- Развитие сильнооточного токового импульса происходит за счет симметричного расширения канала вспомогательного разряда, поэтому не происходит локального перегрева внутренней поверхности оболочки лампы, что повышает долговечность лампы.

- Вспомогательный разряд обеспечивает зажигание импульсной цезиевой лампы в случае наличия на поверхности оболочки цезиевой пленки, шунтирующей электроды.

- Напряжение дежурной дуги служит показателем давления паров цезия в разряде и позволяет за счет обратной связи в цепи электрического питания лампы регулировать ее характеристики излучения.

- Вспомогательный разряд обеспечивает амплитудную стабильность импульсов излучения в импульсно – периодической структуре выходного сигнала ОЭС.

Автор выражает надежду, что представленные результаты будут полезны разработчикам изделий плазменной электроники, основанных на использовании разряда высокого давления в парах щелочных металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6 (4). С. 333–348.
2. Гавриш С.В., Гайдуков Е.Н., Константинов Б.А. и др. // Светотехника. 1998. № 3. С. 22–24.
3. Гавриш С.В., Градов В.М., Терентьев Ю.И. // Светотехника. 2008. № 2. С. 12–18.
4. Маршак И.С., Дойников А.С., Жильцов В.П. и др. Импульсные источники света (2-е изд., перераб. и доп.). 1978. Москва: Энергия.
5. Гавриш С.В. // Прикладная физика. 2018. № 6. С. 84–89.
6. Bayha W.T., Creedon J. E., Schneider S. // IEEE Trans. Electron Dev. 1970. V. 17 (8). P. 612–616.
7. Gunther K., Kloss H.G., Lehmann T. et al. // Contrib. Plasma Phys. 1990. V. 30 (9). P. 715–724.
8. Schafer R., Stormberg H.P. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57 (7). P. 2512–2518.
9. Richards J., Rees D., Fueloen K. // Appl. Opt. 1983. V. 22 (9). P. 1325–1328.
10. Лагутин Л.Ф., Мустецов Н.П., Зарудный А.А. // Приборы и техника эксперимента. 1984. № 2. С. 178–180.
11. Басов Ю.Г., Михалина Т.И., Никифоров В.Г., Соппин А.И. // Журнал прикладной спектроскопии. 1974. Т. 32 (4). С. 602–606.
12. Walsh P.J., Lama W., Hammond T.J. // J. Appl. Phys. 1984. V. 23 (2). P. 290–292.

Influence of Auxiliary Discharge on the Electrophysical Characteristics of Cesium Pulsed Radiation Sources

S. V. Gavrish*

Research and Development Company Melitta, Moscow, 117977 Russia

*e-mail: svgavr@list.ru

Received May 13, 2022; revised May 16, 2022; accepted May 16, 2022

Abstract—The work is devoted to studying the formation of a high-current stage of a pulsed discharge in cesium vapor from a continuously burning auxiliary plasma channel. A comparison of the electrophysical parameters and the radiation characteristics of a pulsed discharge in the presence and absence of an auxiliary discharge was made. Recommendations for choosing the parameters of the auxiliary discharge source of power to ensure the stability of radiation pulses of opto-electronic systems were given.

Keywords: pulsed discharge, cesium, auxiliary discharge, peak radiant flux, pulse duration, modulation index, mid-IR range