

Особенности сильноточного цезиевого импульсно-периодического разряда как источника видимого излучения

А. А. Богданов, С. В. Гавриш, В. В. Коваль, А. М. Марциновский, И. И. Столяров

Выполнены исследования цезиевого импульсно-периодического разряда в широком диапазоне его параметров на двух лампах с горелками одного диаметра (5 мм), но с разным межэлектродным расстоянием (55 и 22 мм). Обнаружено, что такое уменьшение длины столба плазмы приводит к существенному изменению свойств разряда. На более длинной горелке при повышении давления контракция столба разряда происходит с локализацией плазменного шнура у стенки разрядной трубки, и при дальнейшем увеличении давления наблюдается значительное возрастание светоотдачи. На короткой горелке контракция происходит при меньших давлениях (удельных мощностях) с локализацией плазменного шнура по оси трубки, и не наблюдается увеличения светоотдачи с последующим ростом давления.

Ключевые слова: газовый разряд, безртутные осветительные лампы, цезий, давление паров, световой поток, светоотдача, контракция разрядного столба.

Ссылка: Богданов А. А., Гавриш С. В., Коваль В. В., Марциновский А. М., Столяров И. И. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 16.

Reference: A. A. Bogdanov, S. V. Gavrish, V. V. Koval', A. M. Martsinovsky, and I. I. Stolyarov, Applied Physics, No. 6, 16 (2020) [in Russian].

Введение

В работе [1] были представлены первые результаты экспериментального исследования светоотдачи сильноточного цезиевого импульсно-периодического разряда (ИПР) высокого давления. Было установлено, что наиболее

существенным фактором, влияющим на энергоэффективность цезиевых осветительных ламп, работающих в таком разряде, является давление паров цезия. Измерение светоотдачи при неизменном токовом импульсе в зависимости от давления (мощности разряда) показало, что эта зависимость имеет сравнительно узкий максимум. При этом и особенности изменения светового потока [1], и расчеты и оценки [2–4] указывают на то, что максимум, как и следовало ожидать достигается при радиальной оптической плотности порядка 1 для 6P и 5D континуумов атома Cs, выносящих основную часть видимого света.

Оказалось, однако, что при максимальном исследованном токе, который позволил продвинуться в область давлений в сотни Торр, светоотдача после спада снова начинает заметно возрастать. Этот неожиданный результат был отнесен на счет появляющейся в области минимума контракции разряда, вызывающей его перестройку. Так как этот эффект открывает реальную возможность существен-

Богданов Александр Алексеевич¹, н.с., к.ф.-м.н.

Гавриш Сергей Викторович², нач. отдела источников света, д.т.н.

Коваль Владимир Владимирович¹, стажер-исследователь.

Марциновский Артемий Маркович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

Столяров Игорь Иванович¹, вед. инженер.

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

E-mail: a.bogdanov@mail.ioffe.ru,

amartsinovsky@gmail.com, igor-stolyarov@yandex.ru

² ООО «НПП «Мелитта».

Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.

E-mail: svgavr@list.ru

Статья поступила в редакцию 19 октября 2020 г.

© Богданов А. А., Гавриш С. В., Коваль В. В., Марциновский А. М., Столяров И. И., 2020

ного увеличения светоотдачи, главной целью продолжения исследований стало воспроизведение роста светоотдачи при еще большем токе и на разрядных трубках (горелках) с другими размерами плазменного канала.

Методика эксперимента

Методика подробно описана в [2, 3], поэтому здесь приводятся только самые необходимые сведения.

Измерения проводились на горелках из монокристаллического сапфира с внутренним диаметром $2R = 5$ мм. Расстояние между витыми вольфрамовыми торированными электродами диаметром около 2 мм составляло $d = 55$ (далее «длинная» горелка) и 22 мм («короткая» горелка). Цезий вводился в горелку в избытке для обеспечения разряда в насыщенных парах во всем исследованном диапазоне электрической мощности лампы. Давление пускового газа ксенона составляло 30 Торр в холодном состоянии, что гарантировало устойчивое зажигание разряда. Длинная горелка помещалась в кварцевую откачную трубку, короткая – в отпаянный баллон двухцокольной лампы. Давление паров цезия определялось по результатам термодинамических измерений температуры самой холодной точки лампы, которая конструктивно находилась в вынесенном за пределы разрядного объема герметизированном откачном штенгеле лампы.

Питание ламп осуществлялось импульсным генератором линейно нарастающего тока чередующейся полярности с длительностью импульсов, пропорциональной амплитуде тока ($\tau = 10$ – 50 мкс). Начальное напряжение в импульсе составляло 3 кВ и уменьшалось по мере развития разряда. Регулировать можно было амплитуду импульсов тока (вместе с длительностью) и частоту их следования.

Регистрация напряжения и тока в импульсе осуществлялась двухканальным осциллографом с передачей данных в компьютер и последующим вычислением энергии в импульсе q_p , частоты f и средней мощности W . После введения в компьютер данных по освещенности вычислялась также светоотдача η .

Средняя по времени освещенность измерялась люксметром «ТКА-Люкс», средний световой поток L определялся методом зо-

нальных телесных углов с измеренным значением эффективного телесного угла $\Omega_{\text{эфф}} = 11,2$. Временная зависимость освещенности по импульсу с разрешением ~ 1 мкс записывалась осциллографом с помощью специального динамического люксметра на фотодиоде. Ее интеграл по времени определяет усредненную по спектру, свернутому с кривой чувствительности глаза, «видимую» световую энергию в импульсе l_p , что дает второе независимое значение $\eta = l_p/q_p$ (обычно оба значения были близки и усреднялись).

Результаты и их обсуждение

Опыт предыдущей работы показал, что наиболее удобно и информативно проводить серии измерений светоотдачи при одном и том же импульсе тока, меняя частоту. При этом меняется средняя мощность, вкладываемая в разряд, а с нею – температура горелки и ее холодной точки, определяющей равновесное давление паров цезия. В результате получается зависимость светоотдачи лампы при постоянном импульсе тока от средней мощности и давления, меняющихся одновременно. При этом мощность и давление цезия связаны практически однозначно. Эта связь $P_{\text{Cs}}(W)$ не зависит от амплитуды импульса тока I_m и определяется типом лампы.

Поскольку измерения были начаты на той же лампе с длинной горелкой, что и в [1], после ее ремонта и длительного перерыва, вначале была повторена последняя серия предыдущих измерений с током $I_m = 80$ А. Как видно из рис. 1, на котором представлены результаты всех измерений, выполненных на этой лампе для различных I_m , зависимость светоотдачи от средней мощности разряда воспроизвелась достаточно хорошо (сравнить точки 4 и 5). Самое важное, воспроизвелась главная особенность зависимости $\eta(W)$ для этого тока – переход от спада к возрастанию светоотдачи при визуальной наблюдаемой контракции заполнявшего всю разрядную трубку светящегося столба в шнур диаметром ~ 2 мм с перемещающейся локализацией его на стенке горелки [1]. Такой же результат получился и для последующей серии измерений с током $I_m = 100$ А (точки 6) и 120 А (точки 7). При этом детали эволюции разряда, о которых

можно судить по изменению других его характеристик, с ростом вкладываемой энергии и давления полностью повторяют случай $I_m = 80$ А.

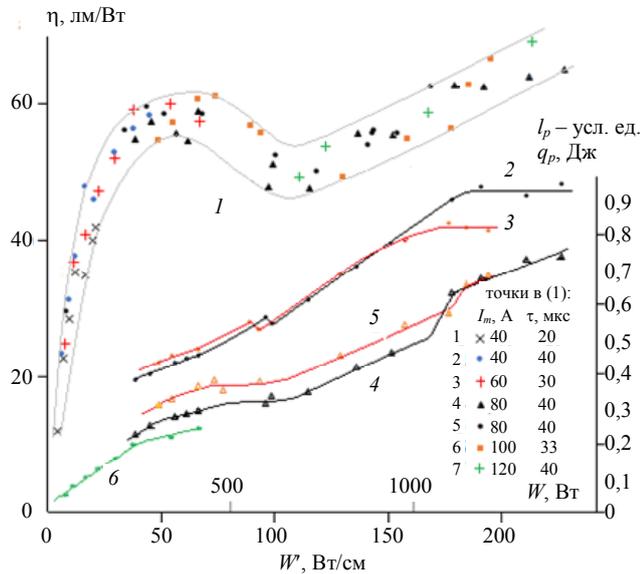


Рис. 1. Зависимость от мощности (давления) при постоянном импульсе тока светоотдачи η (1, точки), энерговклада в импульсе q_p (кривые 2, 3) и световой энергии в импульсе l_p (кривые 4–6) для горелки с $d = 55$ мм. $I_m = 80$ А – для кривых 2, 4; 100 А – для кривых 3, 5 и 60 А – для кривой 6.

Так, световая энергия в импульсе l_p для тока 100 А (кривая 5) тоже выходит на насыщение сразу за максимумом светоотдачи, что так же свидетельствует об определяющей роли реабсорбции излучения континуума в формировании максимума светоотдачи. Лишь после контракции (уменьшение диаметра разрядного канала, рост температуры и концентрации в канале) световая энергия снова начинает расти, и, как видно из рисунка, растет достаточно быстро. За счет этого начинает расти и светоотдача, поскольку скорость роста энерговклада в импульсе q_p (кривая 3) практически не меняется. При этом на кривой 3 для тока 100 А при $W = 650$ Вт наблюдается такое же характерное уменьшение энерговклада с ростом давления, прямо свидетельствующее о качественной перестройке разряда. При самых больших мощностях, как и для $I_m = 80$ А, энерговклад в импульсе выходит на полку, а на зависимости $l_p(W)$ наблюдается скачок – что говорит еще об одной перестройке разряда.

Как видно из рис. 1, диапазон исследованных на этой лампе токов был расширен и в

меньшую сторону. Была снята зависимость $\eta(W)$ для тока $I_m = 40$ А, причем при двух длительностях импульса – 20 и 40 мкс, что позволило оценить влияние длительности на светоотдачу – см. рис. 2. Видно, что для $\tau = 40$ мкс кривая $\eta(W)$ идет немного выше, но даже максимальная разность, если исключить область скачков, получается не более 2–3 %.

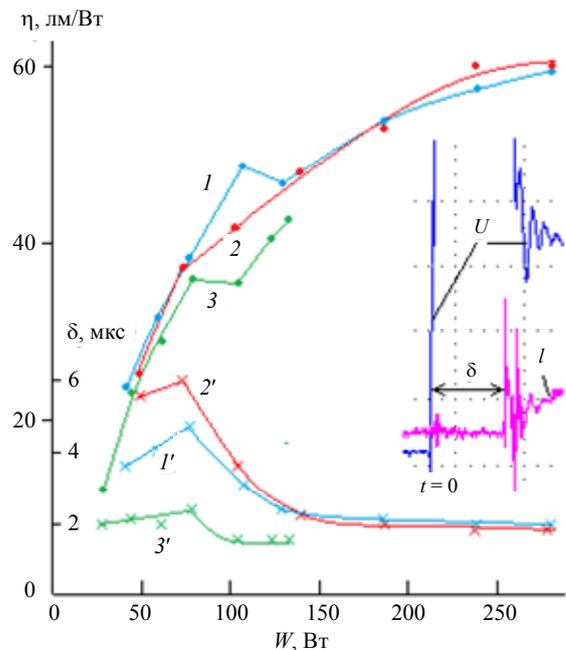


Рис. 2. Зависимость от мощности светоотдачи (1–3) и задержки δ импульса тока (1'–3'). 1, 1' – $I_m = 40$ А, $\tau = 40$ мкс; 2, 2' – 60 А и 30 мкс; 3, 3' – 40 А и 20 мкс.

Скачки на кривых 1 и 3, как показал анализ осциллограмм, связаны с резким уменьшением времени задержки δ между подачей импульса напряжения и началом линейного возрастания тока (см. рис. 2). Это обусловлено спецификой поджига разряда очередным импульсом напряжения в режиме ИПР. При малой мощности лампы, в области относительно низких давлений, задержка растет с давлением, поскольку рост давления увеличивает напряжение поджига. Но при этом растет концентрация плазмы, с ростом частоты уменьшается интервал между импульсами, остаточная плазма перед подачей очередного импульса начинает играть определяющую роль при поджиге – и задержка начинает быстро уменьшаться. По-видимому, изменение механизма поджига меняет и характер последующего развития разряда, раз это заметно сказывается на светоотдаче. Заметим, что

так же меняется задержка и для токового импульса $I_m = 60$ А, но в этом случае на зависимости $\eta(W)$ наблюдается только изменение наклона (кривая 2).

Разброс экспериментальных значений светоотдачи для всех исследованных режимов относительно усредненной кривой $\eta(W)$ невелик (рис. 1). Это, с одной стороны, еще раз подтверждает, что средняя мощность (давление) является ведущим внешним параметром ИПР, определяющим его светотехнические характеристики. С другой стороны, очевидно, что оптимизация режима разряда по параметрам импульса (амплитуда, длительность, форма) может увеличить максимальные значения светоотдачи всего лишь на 5–10%. Значительный рост светоотдачи после контракции (на ~ 20 лм/Вт) указывает на возможность её повышения за счет уменьшения диаметра горелки, тем более что такой эффект отмечался в литературе [5, 6].

Похожие закономерности – с контракцией разрядного столба и ростом светоотдачи при больших мощностях – мы ожидали и для горелки с межэлектродным расстоянием $d = 22$ мм. Но этого не получилось, как видно из рис. 3, на котором для нее приведены, аналогично рис. 1, зависимости $\eta(W)$ для разных I_m . Светоотдача этой лампы в максимуме оказалась приблизительно такой же, как и у предыдущей (даже немного бóльшей), но сам максимум соответствует заметно меньшей удельной мощности $W' \sim 35$ Вт/см (вместо $W' \sim 55$ Вт/см). Это обусловлено ее конструктивной особенностью, приводящей к очень малому теплоотводу по электродам горелки. И ни контракции разрядного столба, подобной наблюдавшейся в предыдущей лампе, ни возрастания светоотдачи в области больших мощностей (давлений), не наблюдалось вплоть до мощностей, пятикратно превышающих мощность в максимуме. Тогда как на предыдущей лампе минимуму соответствует ~ 110 – 120 Вт/см, всего лишь вдвое больше, чем в максимуме. Если предполагать, что и для лампы с короткой горелкой максимуму светоотдачи соответствует примерно то же давление цезия, тогда при максимальных мощностях оно должно быть, как и для предыдущей лампы, близким к 1 атм. Так что в обоих случаях измерения охватывали примерно один и тот же диапазон давлений.

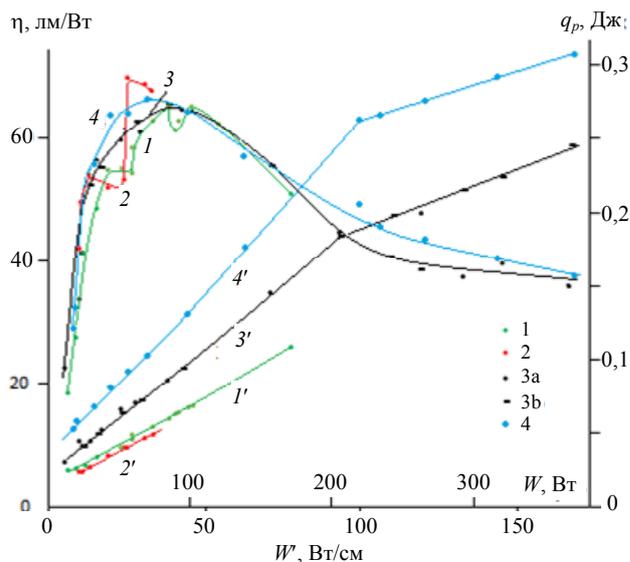


Рис. 3. Зависимость светоотдачи η (1–4) и энерговыклада в импульсе q_p (1'–4') от мощности при постоянном импульсе тока для горелки с $d = 22$ мм. 1, 1' – $I_m = 40$ А, $\tau = 40$ мкс; 2, 2' – 50 А и 25 мкс; 3, 3' – 60 А и 30 мкс, (точки 3a и 3b – измерения в разные дни); 4, 4' – 80 А и 40 мкс.

Как видно из рис. 3, кривые $\eta(W)$ для исследованных значений I_m близки друг к другу. После достижения максимума светоотдача сначала быстро уменьшается, но при удельной мощности ~ 100 Вт/см, где, по аналогии с предыдущей лампой, следовало бы ожидать ее возрастания, наблюдается лишь замедление спада. При этом резко замедляется и рост энерговыклада в импульсе (на рис. 3), что прямо указывает на изменение структуры разряда. Еще нагляднее говорит об этом изменение других параметров (рис. 4). Из рисунка видно, что уменьшение светоотдачи после максимума связано со сравнительно небольшим замедлением роста световой энергии в импульсе (кривые 3 и 4 рис. 4), при неизменной скорости роста энерговыклада в импульсе (1' и 2' рис. 3). В точке замедления спада светоотдачи ($W' \approx 100$ Вт/см) l_p резко уменьшается, а дальше меняется немонотонно. При этом одинаковый характер изменения для разных амплитуд токовых импульсов говорит о том, что это не случайная ошибка измерений, а следствие соответствующего изменения характера разряда. Пиковая интенсивность светового потока в конце импульса I_m (кривая 5) к точке $W' \approx 100$ Вт/см выходит на насыщение и тоже резко падает, но затем она сохраняется почти на одном и том же уровне без колебаний.

А напряжение в конце импульса, от которого в первую очередь зависит энерговклад (кривая 6), растет до точки замедления и после нее перестает меняться.

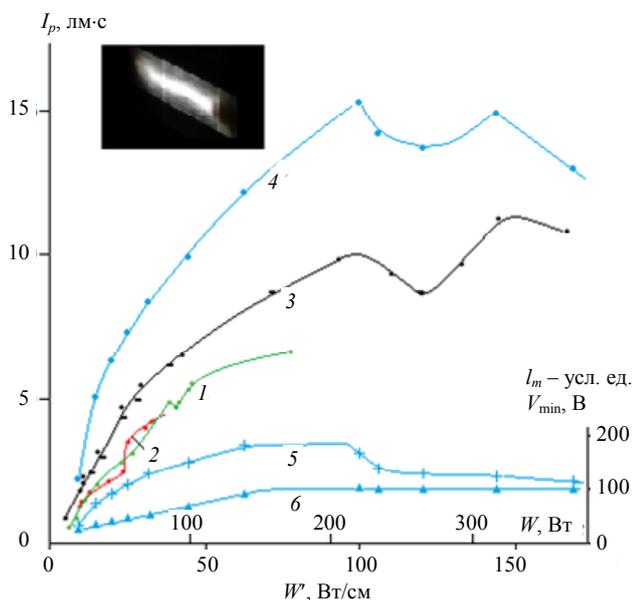


Рис. 4. Зависимость от мощности световой энергии в импульсе I_p (1–4), пикового значения светового потока в конце импульса I_m (5) и напряжения на лампе в конце импульса V_{min} (6) для горелки с $d = 22$ мм. Для кривой 1 $I_m = 40$ А; 2 – 50 А; 3 – 60 А; для кривых 4–6 – 40 А.

Еще одна интересная особенность короткой горелки – воспроизводимый немонотонный ход зависимости $\eta(W)$ в области максимума для токов $I_m = 40$ и 50 А. Из-за малого межэлектродного расстояния задержка поджига здесь везде мала (~ 2 мкс) и не определяет скачки светоотдачи. Они коррелируют с другим параметром – световой энергией в импульсе (кривые 1 и 2 на рис. 4).

Было проведено фотографирование изображения лампы, спроектированного сильно задиафрагмированной линзой на экран. Оказалось, что уже при мощностях $W = 70$ –80 Вт (при $I_m = 80$ А), ненамного превышающих мощность, соответствующую мощностям (давлениям) в максимуме кривых $\eta(W)$, свечение стягивается в шнур, по диаметру приблизительно соответствующий диаметру электродов (~ 2 мм) – см. фото на рис. 4. При этом разрядный канал, в отличие от длинной горелки, нигде не касается ее стенок, хотя может заметно отклоняться от оси.

Это показывает, что достаточно малое межэлектродное расстояние меняет развитие,

локализацию и геометрию разрядного канала при контракции, а это обуславливает существенное различие в характере зависимости светоотдачи от давления. По-видимому, чем меньше межэлектродное расстояние, тем при меньших давлениях будет происходить переход разряда в контрагированное состояние с диаметром канала, зависящим в первую очередь от диаметра электродов. При этом уже для $d = 22$ мм ($d/2r = 4,5$) разрядный канал располагается по оси трубки, не касаясь стенок, как в лампах высокого давления с короткой дугой, для которых $d/2r \approx 1$ [7].

Очевидно, что переход в такой режим, когда вкладываемая мощность сосредоточена в меньшем объеме (примерно в 6 раз), будет сопровождаться значительным ростом температуры с соответствующим уменьшением концентрации тяжелых частиц на оси разряда (вытеснение их к стенкам), и переходом цезиевой компоненты в полностью ионизованное состояние. После чего подводимая мощность будет закачиваться в поступательные степени свободы несвязанных электронов и ионов вследствие высоких потенциалов возбуждения и ионизации ионов цезия. Это приводит к быстрому росту температуры в импульсе, а при $T = (11$ – $12) \times 10^3$ К начнется возбуждение и ионизация ксенона, а потом и ионов цезия – что и наблюдалось нами при спектральных исследованиях лампы с горелкой $d = 22$ мм в режимах недалеко за максимумом светоотдачи [4]. Именно эти процессы, по-видимому, и определяют изменение светоотдачи на спадающей ветви зависимости $\eta(W)$ для короткой горелки. Тогда как для длинной, как уже отмечалось выше, участок спада образуется за счет реабсорбции излучения континуума.

В случае разрядного канала, расположенного у стенки, протекающие процессы должны быть иными – хотя бы потому, что в таких режимах наблюдались температуры лишь в диапазоне 5000–7000 К [4]. Увеличение светоотдачи в них связано, скорее всего, с уменьшением реабсорбции излучения континуума при уменьшении расстояния между основной излучающей областью и стенкой. Более определенно судить об этом можно будет только после детального изучения этих режимов. Это представляет существенный интерес не только для цезиевых осветительных ИПР ламп, но и для инфракрасных [8].

Заключение

Выполненные исследования показали, что уменьшение межэлектродного расстояния с 55 до 22 мм меняет характер цезиевого импульсно-периодического разряда. В длинной горелке положительный столб разряда при достаточно большом давлении паров цезия контрагирует с локализацией у стенки горелки, и такая контракция приводит к существенному увеличению светоотдачи лампы при дальнейшем повышении давления. В короткой горелке контракция происходит при меньшем давлении, разрядный канал находится при этом в центре трубки. Выяснение деталей этих процессов с возможностью их практического использования для повышения светоотдачи ламп, требуют дальнейшего исследования с применением спектральной диагностики. Это представляет существенный интерес не только для цезиевых осветительных ИПР ламп, но и

для импульсных инфракрасных источников излучения [8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриш С. В., Каплан В. Б., Марциновский А. М., Столяров И. И. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 78.
2. Baksht F. G., Gavrish S. V., Kaplan V. B., Lapshin V. F., Martsinovskiy A. M. // Plasma Phys. Rep. 2010. Vol. 36. № 13. P. 1199.
3. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 525.
4. Богданов А. А., Гавриш С. В., Марциновский А. М., Столяров И. И. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 326.
5. Gu H., Muzeroll M. E., Chamberlain J. C., Maya J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. Vol. 10. P. 1.
6. Rakic P. M., Pichler G. // J. Quant Spectrosc Radiat Transf. 2015. Vol. 151. P. 169.
7. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. 2 изд. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.

PACS: 52.80.Mg

Features of a high-current cesium repetitively pulsed discharge as a source of visible radiation

A. A. Bogdanov¹, S. V. Gavrish², V. V. Koval'¹, A. M. Martsinovskiy¹, and I. I. Stolyarov¹

¹ Ioffe Institute

26 Polytekhnicheskaya st., St. Petersburg, 194021, Russia

² Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia

Received October 19, 2020

Research has been carried out on a pulse-periodic cesium discharge in a wide range of its parameters on two lamps with burners of the same diameter (5 mm), but with different interelectrode spacing (55 and 22 mm). It was found that such a decrease in the length of the plasma column leads to a significant change in the properties of the discharge. On a longer burner, with increasing pressure, contraction of the discharge column occurs with the localization of the plasma column at the wall of the discharge tube, and a significant increase in lamp efficacy is observed with a further increase in pressure. On a short burner, contraction occurs at lower pressures (specific powers) with the localization of the plasma column along the tube axis, and there is no increase in lamp efficacy with a subsequent increase in pressure.

Keywords: gas discharge, mercury-free luminous lamps, cesium, vapor pressure, light flux, lamp efficacy, discharge column contraction.

REFERENCES

1. S. V. Gavrish, V. B. Kaplan, A. M. Martsinovsky, and I. I. Stolyarov, *Applied Physics*, No. 5, 78 (2019) [in Russian].
2. F. G. Baksht, S. V. Gavrish, V. B. Kaplan, V. F. Lapshin, and A. M. Martsinovsky, *Plasma Phys. Rep.* **36**, 1199 (2010).
3. F. G. Baksht and V. F. Lapshin, *Usp. Prikl. Fiz.* **5**, 525 (2017).
4. A. A. Bogdanov, S. V. Gavrish, A. M. Martsinovsky, and I. I. Stolyarov, *Usp. Prikl. Fiz.* **8**, 326 (2020).
5. H. Gu, M. E. Muzeroll, J. C. Chamberlain, and J. Maya, *Plasma Sources Sci. Technol.* **10**, 1 (2001).
6. P. M. Rakic and G. Pichler, *J Quant Spectrosc Radiat Transf.* **151**, 169 (2015).
7. G. N. Rokhlin, *Razryadnye istochniki sveta* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
8. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, *Usp. Prikl. Fiz.* **6**, 333 (2018).