

УДК 537.52, 621.327.53
EDN: TVMRUB

PACS: 52.80.Mg

**Зависимость световых характеристик цезиевого импульсно-периодического разряда от режима работы лампы***А. А. Богданов, С. В. Гавриш, В. В. Коваль, А. М. Марциновский,
А. В. Маслевцов, И. И. Столяров*

Приведены результаты исследования взаимосвязи световых характеристик цезиевого импульсно-периодического разряда с режимами электрического питания газоразрядной лампы. Разработано техническое решение генератора коротких (~10 мкс) биполярных импульсов тока в виде серии из нескольких импульсов с регулируемыми паузами между сериями, на котором проведено сопоставление характеристик импульсно-периодического разряда с параметрами лампы в режимах одиночных импульсов длительностью, соответствующей временной протяженности серии. В случае импульсно-периодического разряда с биполярными импульсами установлено, что достигнутое значение светоотдачи $\eta = 50$ лм/Вт существенно ниже максимума η (63 лм/Вт), полученного при работе лампы в режиме одиночных импульсов с пиковым током 40 А. В то же время показано, что при одинаковых пиковых значениях тока (20 А) зависимость светоотдачи от электрической мощности лампы в обоих режимах оказывается практически идентичной, что позволяет создать компактную пускорегулирующую аппаратуру для цезиевых ламп импульсно-периодического разряда.

Ключевые слова: газовый разряд, цезий, световой поток, рекомбинационный континуум, концентрация и температура плазмы, ультрафиолетовое излучение.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-97-104

Введение

Осветительные цезиевые лампы с сильноточным импульсно-периодическим разрядом (ИПР) являются экологически безопасными газоразрядными источниками с высоким качеством света (индекс цветопередачи Ra до 98), с достаточно большой энергоэффективностью (до 60–70 лм/Вт) и низкой себе-

стоимостью [1–3]. Удачное сочетание перечисленных характеристик позволяет им успешно конкурировать с другими газоразрядными лампами и светодиодами в области высококачественного освещения и при генерации больших световых потоков. В цезиевых лампах ИПР рекомбинационный континуум распространяется на УФ интервал спектра, поэтому данные источники света оказы-

Богданов Александр Алексеевич¹, н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: a.bogdanov@mail.ioffe.ru

Гавриш Сергей Викторович², нач. отдела, д.т.н.
E-mail: svgavr@list.ru

Коваль Владимир Владимирович¹, стажер-исследователь.

Марциновский Артемий Маркович¹, с.н.с., к.ф.-м.н.
E-mail: amartsinovsky@gmail.com

Маслевцов Андрей Вадимович¹, вед. инженер.

Столяров Игорь Иванович¹, вед. инженер.
E-mail: igor-stolyarov@yandex.ru

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

² ООО «НПП «Мелитта».

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

Статья поступила в редакцию 08 ноября 2022 г.

© Богданов А. А., Гавриш С. В., Коваль В. В., Марциновский А. М., Маслевцов А. В., Столяров И. И., 2022

ваются вне конкуренции при создании систем (приборов) внутреннего освещения с дозированным ультрафиолетовым излучением в А и В областях. Эти приборы применяются для компенсации дефицита УФ-излучения зимой в высоких широтах Земли [4–6]. По нашим оценкам цезиевые лампы могут заменить в существующих системах такого рода осветительные и эритемные люминесцентные лампы (ЛЭ, ЛЭР) при уменьшении потребляемой мощности. В цезиевых лампах соотношение доли мощности в УФ-области и в видимом диапазоне зависит от электрического режима работы, что создает перспективу прямой замены традиционных источников света на цезиевую лампу импульсно-периодического разряда в системах бытового внутреннего освещения с профилактической дозой УФ-излучения.

В предшествующих работах [1–3] исследовались электрические параметры и световые характеристики цезиевого ИПР при работе лампы с одиночными импульсами чередующейся полярности линейно нарастающего тока с быстрым его уменьшением до нуля при окончании импульса. Длительность импульсов составляла $(20 \div 50)$ мкс при частоте следования $(10 \div 1500)$ Гц (режим I). В данной публикации исследуются некоторые особенности работы цезиевой лампы при замене одиночных импульсов тока на серию из нескольких, следующих один за другим, биполярных импульсов (режим II).

В режиме II одиночный импульс тока в серии имеет длительность значительно меньше, чем в режиме I, но суммарный временной интервал серии (рис. 1б) порядка или даже больше длительности одиночных импульсов в режиме I.

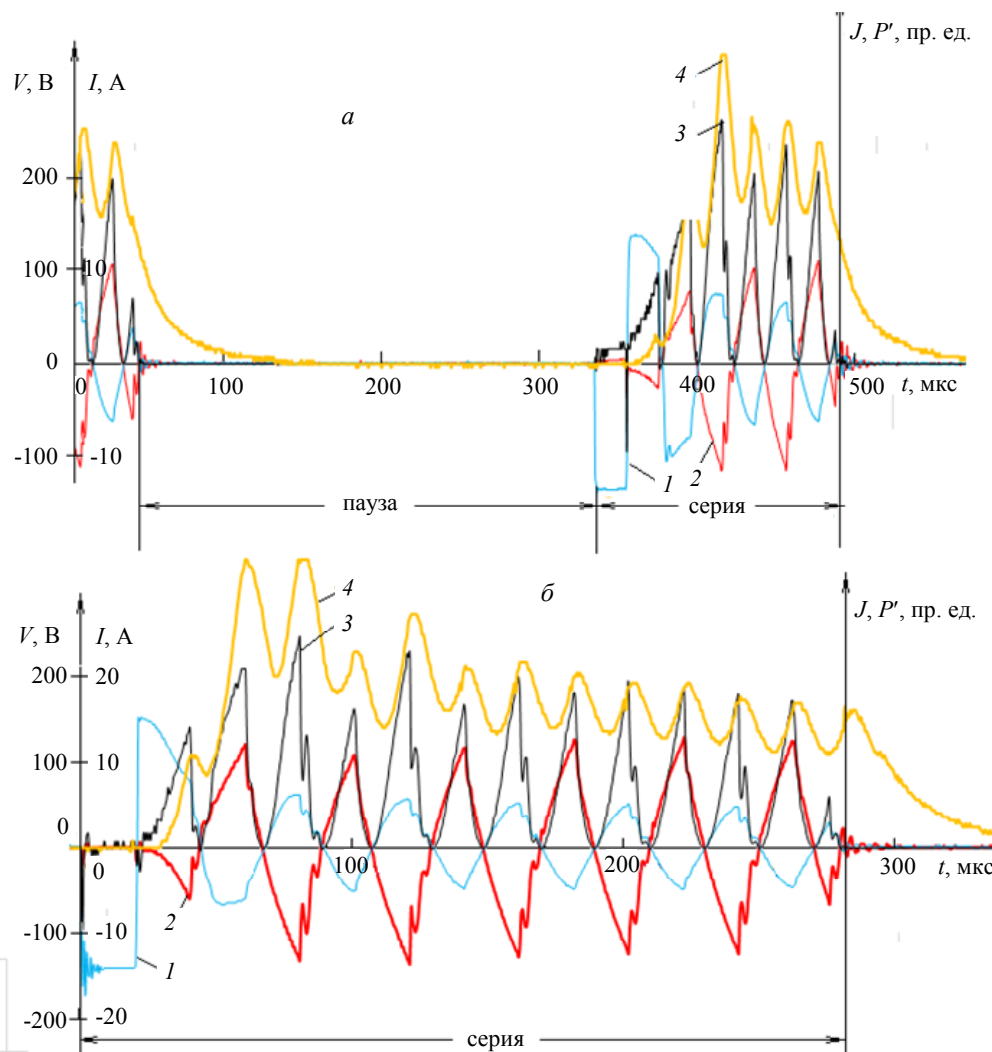


Рис. 1. Временные зависимости параметров разряда с сериями импульсов. а – короткая серия, $W = 112 \text{ Вт}$, $f_s = 2240 \text{ Гц}$; б – длинная, $W = 58 \text{ Вт}$, $f_s = 1050 \text{ Гц}$. 1 – напряжение, 2 – ток, 3 – мощность, 4 – световой поток

Применение предложенной импульсно-периодической структуры импульсов напряжения позволяет значительно уменьшить массовые и габаритные показатели источников электрического питания при практическом использовании цезиевых ламп. Аналогичный подход использовался в работе [7] при применении прямоугольных импульсов напряжения к газоразрядному источнику света с бинарным (Cs + Hg) наполнением. В отличие от работы [7] в наших предшествующих работах [2, 3] использовался генератор импульсов тока, что для достижения высоких световых характеристик предпочтительнее, так как обеспечивается более высокая скорость нарастания тока в импульсе на начальной стадии поджига разряда. При этом значения падения напряжения на газоразрядной лампе в начале и в конце импульса тока обычно различаются более чем на порядок. Для понимания процессов в цезиевой плазме такой подход создавал большие удобства при сравнении экспериментальных и теоретических результатов, а также при сопоставлении данных исследований ламп с разным межэлектродным расстоянием.

Для реализации импульсно-периодического режима электрического питания экспериментальных образцов ламп необходимо установить, как влияют амплитуда, длительность и частота токовых импульсов в серии, а также частота повторения серий на электрические и световые характеристики ламп и их светоотдачу. Поэтому всталла задача разработки источника питания, позволявшего независимо изменять указанные параметры в области предполагаемых оптимальных значений, исходя из опыта и результатов, полученных на генераторе одиночных импульсов [1, 2]. Для длительности импульса был выбран диапазон (5÷20) мкс, их число в серии от 1 до 12, ступенчатое изменение амплитуды импульса тока от 4 до 20 А, максимальное напряжение в импульсах до 140 В, частота повторения серий до ~3000 Гц.

Методика исследований и особенности генератора биполярных импульсов

Большую сложность в разработке стабильного импульсного генератора для пита-

ния ламп создаёт сам характер нагрузки. При этом электрическое сопротивление лампы может меняться в широком диапазоне значений как на протяжении отдельного импульса или серии импульсов, так и при выходе в номинальный режим работы из исходного, холодного состояния, когда меняется средняя мощность и среднее давление. Это связано с тем, что сами параметры разрядной плазмы в таких условиях меняются в широком диапазоне значений, в частности концентрация плазмы на несколько порядков. При этом для каждого режима по-своему. Не останавливаясь на подробностях схемотехнических решений разработанного генератора, подчеркнем, что не для всех разрядных режимов этот прибор в полной мере соответствовал всем необходимым требованиям. В то же время полученные результаты представляют несомненный интерес как с точки зрения полученных светотехнических характеристик лампы, так и с точки зрения совершенствования реализованного подхода в питании разряда.

В наших экспериментах исследовалась цезиевая разрядная трубка (горелка) с внутренним диаметром $2r = 5$ мм и межэлектродным расстоянием $L = 22$ мм, размещенная в вакуумированной внешней колбе из кварцевого стекла [2, 3]. При измерениях регистрировались осциллограммы импульсов напряжения, тока и освещенности перпендикулярно оси лампы на расстоянии достаточно большом $\sim 1 \text{ м} \gg L$, что позволяло определить энерговыход и интегральный световой поток в импульсе, частоту, мощность лампы, среднее значение полного светового потока и светоотдачу (при эффективном телесном угле лампы $\Omega_{\text{эф}} = 11,2$).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлена построенная по осциллограммам типичная временная зависимость тока $I(t)$, напряжения $V(t)$ и светового потока $J(t)$, а также зависимость сосчитанной мгновенной мощности разряда от времени $P'(t) = I(t) \times V(t)$ для условно малого ($a, n < \sim 3$) и большого ($b, n > \sim 5$) числа биполярных импульсов в серии. Длительность отдельного импульса в обоих случаях максимальная для

генератора ($\tau_i = 20$ мкс, соответственно для биполярного импульса $2\tau_i = 40$ мкс). Заметим, что в первом случае из-за высокой частоты следования биполярных серий регистрировалась не только пауза между сериями, но и конец предыдущей серии. Столь высокая частота, при которой скважность уже приближается к 1, оказалась необходимой из-за сравнительно небольшого предельного тока генератора (20 А), так что при малом n получить среднюю мощность лампы $W \sim 50\text{--}100$ Вт можно было только при таких частотах.

Как видно из рис. 1, при поджиге разряда на стадии задержки пробоя, когда ток разряда еще мал, импульсы напряжения остаются прямоугольными. Происходит только смена полярности приложенного к электродам напряжения, что при поджиге разрядов с термоэмиттирующими электродами несущественно для развития процессов ионизации. Лишь на стадии пробоя, когда разрядный ток достигает уровня в несколько ампер, напряжение разряда начинает уменьшаться с ростом тока из-за наличия индуктивности в цепи разряда. При еще больших разрядных токах роль индуктивности становится определяющей, она формирует практически треугольные импульсы тока и напряжения с примерно одинаковым временем нарастания и спада. Такую же форму получают импульсы подводимой к разряду мощности. Амплитуда импульсов мощности максимальна в начале серии и быстро (за 2–3 импульса) выходит на практически постоянный уровень. Таким образом, усредненное по времени в отдельном импульсе значение мощности, приближенно равное половине амплитудного значения пиков, остается неизменным, т. е. на протяжении всей серии сохраняется примерно постоянной величина подводимой к разряду мощности. Излучаемый разрядом световой поток при формировании плазмы в первом импульсе (или первых импульсах, когда поджиг задержан и растянут) следует за вложенной мощностью, а затем повторяет ее пики с небольшим ($\sim 1\text{--}2$ мкс) отставанием, которое определяется инерцион-

ностью ступенчатой ионизации. Уменьшение светимости между пиками оказывается обычно небольшим из-за инерционности плотной плазмы (большого запаса энергии в плазме в виде энергии ионизации и возбуждения связанных электронов), так что световой импульс получается близким к прямоугольной форме. В результате основная часть световой энергии выносится из плазмы со спектральным распределением, близким спектру при максимальной интенсивности. Такой результат в корне отличается от режима I одиночных импульсов тока, где импульс светового потока близок к треугольной форме, а периоды нарастания и спада вносят заметный вклад в усредненный спектр. В режиме II разница между средней по времени и пиковой освещенностью для биполярных серий получается намного меньшей.

Главной задачей при исследовании лампы в режиме II было снятие зависимости светоотдачи от мощности лампы за счет изменения частоты серий биполярных импульсов, при различных сочетаниях параметров серии, сохраняющихся при этом постоянными. Сопоставление таких зависимостей между собой и с такими же зависимостями в режиме I дало бы полную картину влияния параметров серии на светоотдачу и позволило бы определить оптимальные условия для максимальной светоотдачи. К сожалению, для этой цели выбранная нами ступенчатая регулировка частоты оказалась слишком грубой. К тому же для того, чтобы разряд самопроизвольно не погас при выходе на стационарный режим, обычно приходилось менять в процессе выхода параметры серии биполярных импульсов, так что конечный установившийся режим разряда в большей или меньшей степени отличался от первоначально установленного. В результате, вместо семейства кривых $\eta(W)$ для разных параметров серии измерения, дали «облако» значений светоотдачи при случайных значениях параметров (рис. 2). Но и такой набор данных позволяет сделать предварительные важные заключения.

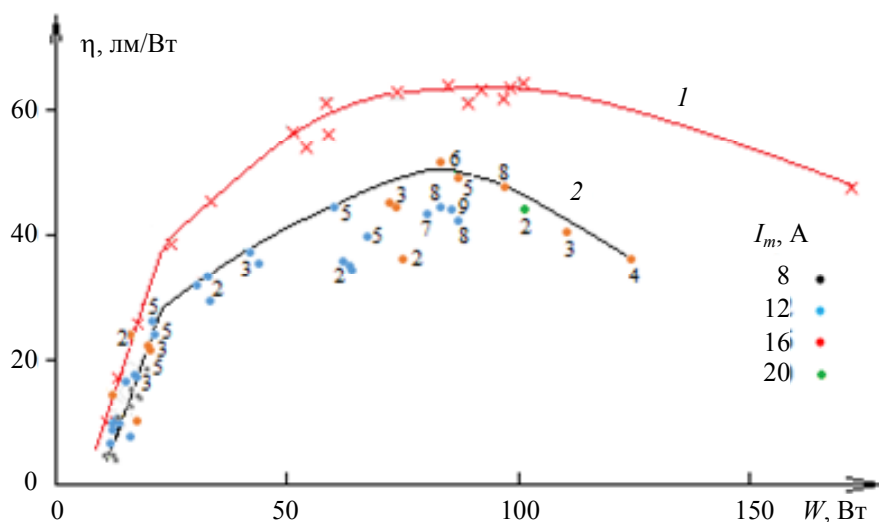


Рис. 2. Сравнение светоотдачи лампы в режиме одиночных импульсов (1) и серий импульсов (2). Цифры у точек соответствуют числу биполярных импульсов в серии

Прежде всего, можно констатировать, что проведенная по верхней границе полученного массива точек кривая $\eta(W)$ оказалась не только подобна зависимости светоотдачи от мощности в случае режима I, но и сравнительно близко к ней расположена (рис. 2). В обоих случаях четко выражен начальный участок быстрого, практически линейного роста светоотдачи с увеличением мощности (давления), далее наблюдается излом с резким замедлением роста, выход на максимум и затем спад. Изломам и максимумам на кривых 1 и 2 соответствуют практически одинаковая мощность – соответственно 20–25 Вт и 70–90 Вт.

Анализ данных рис. 2 показывает, что на верхней границе режима 2 в большинстве случаев наблюдаются высокие значения ам-

плитуды импульсов тока и значительное число импульсов в серии. Это позволяет предположить, что одной из причин расхождения кривых 1 и 2 (рис. 2) являются сравнительно малые амплитуды тока в сериях импульсов (10–20 А). При таких значениях тока в случае питания газоразрядной лампы от генератора одиночных импульсов наблюдается заметное падение светоотдачи с уменьшением тока как в расчетах работы [10], так и в наших экспериментах. Важно отметить, что при малых значениях амплитуды одиночных импульсов тока из-за малой их длительности и невысокой частоты следования средние мощности лампы ограничены начальным линейным участком кривой $\eta(W)$. На рис. 3 приведены четыре таких участка для $I_m \leq 40$ А.

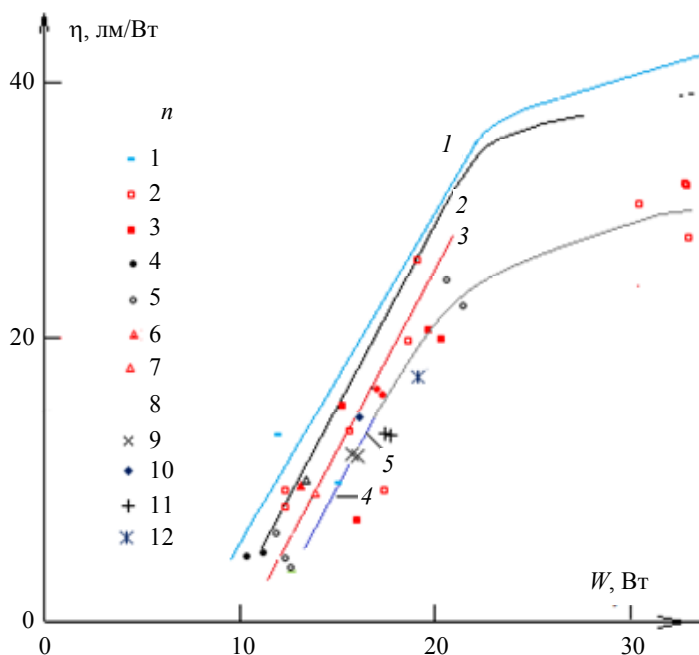


Рис. 3. Сравнение светоотдачи лампы в режимах одиночных импульсов и серий биполярных в области малых мощностей. Сплошные линии – зависимость светоотдачи от средней мощности разряда в режиме одиночных импульсов; амплитуды импульсов, А: 1 – 40, 2 – 30, 3 – 25, 4 – 20. Точки – режимы серий биполярных импульсов; число импульсов в серии соответствует типу маркера точки, а его цвет – пиковой силе тока в импульсе: черный – 8 А, красный – 12 А, голубой – 16 А. Кривая 5, продолжающая прямую 4 – усреднение верхней части массива точек

Из представленных данных видно, что при уменьшении тока лампы линии $\eta(W)$ существенно сдвигаются вниз относительно верхней зависимости при $I_m = 40$ А (которая представляет часть кривой 1 на рис. 2). Для детального сопоставления на кривых нанесены точки, соответствующие режиму II. Видно, что практически все они лежат ниже линии 1 для $I_m = 40$ А. В то же время линия 4 ($I_m = 20$ А) проходит примерно посередине этого вытянутого массива точек, таким образом, около половины точек оказывается выше её, при этом относительное увеличение светоотдачи может достигать до 1,5–2 раз. Отсюда можно сделать вывод, что при примерно одинаковом максимальном токе в импульсе режим с сериями в целом не только не уступает режиму одиночных импульсов, но может быть даже эффективнее его – особенно если длительность одиночного импульса не оптимизирована, а вариация параметров серии захватывает и оптимальные режимы. Скорее всего, именно такая ситуация и сложилась в нашем случае. Поэтому есть все основания полагать, что в режиме II для биполярных импульсов с максимальным током 40 А, при правильном подборе параметров серии, можно будет получить светоотдачу не только на уровне кривой 1 на рис. 2, но даже большую.

Как уже отмечалось ранее, в наших прежних исследованиях [1–3] в режиме I световая энергия, излучаемая после окончания треугольного импульса тока, была сопоставима с энергией, испускаемой за время прохождения импульса. Это связано с большим запасом энергии, который создаётся к моменту окончания токового импульса в виде энергии ионизации. В данном случае релаксация плазмы имеет преимущественно оптический характер при достигнутых высоких уровнях концентрации. При этом из-за малого времени релаксации другие каналы энергетических потерь в распадающейся плазме малозначительны. В случае питания разряда сериями импульсов (рис. 1б, кривая 4) почти вся световая энергия излучается за время прохождения серии. Световой поток в серии, быстро достигнув некоторого уровня, в силу указанных выше причин, слабо меняется вплоть до окончания серии. Наблюдаемые колебания светового потока небольшой амплитуды свя-

заны с частичной релаксацией разряда, когда вкладываемая мгновенная мощность (кривая 3 на рис. 1б) в каждом импульсе серии уменьшается до нуля. После окончания серии импульсов тока наблюдается небольшой участок окончательной релаксации светового потока. Рассмотренные особенности позволяют лучше понять, почему на облаке точек на рис. 2 присутствуют близкорасположенные точки с существенно разными длительностями серий.

Результаты настоящей работы позволяют также высказать предположение, что полученное в [7] максимальное значение светоотдачи 46,4 лм/Вт при питании лампы сериями биполярных импульсов лимитировано в первую очередь недостаточной величиной максимального тока в импульсе (24 А). Если учесть, что там использовались горелки из поликристаллического сапфира, поглощающие ~10 % света, светоотдача получается примерно та же, что и у нас (50 лм/Вт) с сериями биполярных импульсов с близким током в импульсе. Близость результатов показывает, что введение ртути как буферного и поджигающего газа не дает такому наполнению особых преимуществ.

Выводы

С практической точки зрения достигнутый уровень светоотдачи цезиевой ИПР лампы с сериями биполярных импульсов с током до 20 А позволяет считать, что на базе уже отработанных вариантов ламп и ПРА на такие токи можно реализовать экологически безопасные источники высококачественного света со светоотдачей ~50 лм/Вт. Это делает их применение целесообразным уже сейчас в целом ряде секторов освещения. И в первую очередь для освещения с дозированным профилактическим ультрафиолетом [6]. Разработка ПРА на токи до 40 А должна увеличить светоотдачу не менее чем до 60–65 лм/Вт, что еще больше расширит возможные области применения цезиевых осветительных ламп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакиит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 525.

2. Гавриш С. В., Каплан В. Б., Марциновский А. М., Столяров И. И. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 78.
3. Богданов А. А., Гавриш С. В., Коваль В. В., Марциновский А. М., Столяров И. И. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 16.
4. Румянцев Г. И. Гигиена. – М.: ГЭОТАР-Медицина, 2001.
5. Wacker M., Holick M. F. // *Dermato-endocrinology*. 2013. Vol. 5. P. 51.
6. Ненахова Е. В., Николаева Л. А. Ультрафиолетовое излучение. Влияние ультрафиолетового излучения на организм человека. – Иркутск: ИГМУ, 2020.
7. Gu H., Muzeroll M. E., Chamberlain J. C., Maya J. // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2001. Vol. 10. P. 1.
8. Бакуит Ф. Г., Гавриш С. В., Каплан В. Б., Коротков С. В., Лапшин В. Ф., Марциновский А. М., Столяров И. И., Христюк Д. В. // ПЖТФ. 2008. Т. 34(24). С. 55.
9. Бабанин В. И., Каплан В. Б., Марциновский А. М., Эндер А. Я. // ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 1467.
10. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф., Шиман А. С. // Светотехника. 2005. № 3. С. 20.
11. Гавриш С. В., Каплан В. Б., Марциновский А. М., Столяров И. И. // ПЖТФ. 2015. Т. 41(14). С. 64.

PACS: 52.80.Mg

Dependence of the light characteristics of a cesium repetitively pulsed discharge on the operating modes of the lamp

*A. A. Bogdanov¹, S. V. Gavrish², V. V. Koval'¹, A. M. Martsinovsky¹,
A. V. Maslevtsov¹ and I. I. Stolyarov¹*

¹ Ioffe Institute

26 Polytekhnikeskaya st., St. Petersburg, 194021, Russia
E-mail: a.bogdanov@mail.ioffe.ru

² Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia
E-mail: svgavr@list.ru

Received November 08, 2022

The results of a study of the relationship between the light characteristics of a cesium pulse-periodic discharge and the modes of electric power supply of a gas-discharge lamp are presented. A technical solution was developed for the generator of short ($\sim 10 \mu\text{s}$) bipolar current pulses in the form of a series of several pulses with adjustable pauses between series, on which the characteristics of a repetitively pulsed discharge were compared with the lamp parameters in single pulse modes with a duration corresponding to the time length of the series. In the case of a repetitively pulsed discharge, it was found that the achieved value of light output $\eta = 50 \text{ lm/W}$ is significantly lower than the maximum η (63 lm/W) obtained when the lamp was operated in single pulse mode with a peak current of 40 A. At the same time, it was shown that when. At the same peak current values (20 A), the dependence of light output on the electric power of the lamp in both modes turns out to be almost identical, which makes it possible compact ballasts to create for cesium lamps of a pulsed-periodic discharge.

Keywords: gas discharge, cesium, luminous flux, recombination continuum, plasma concentration and temperature, ultraviolet radiation.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-97-104

REFERENCES

1. F. G. Baksht and V. F. Lapshin, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (6), 525 (2017).
2. S. V. Gavrish, V. B. Kaplan, A. M. Martsinovsky and I. I. Stolyarov, *Applied Physics*, No. 5, 78 (2019) [in Russian].
3. A. A. Bogdanov, S. V. Gavrish, V. V. Koval', A. M. Martsinovsky and I. I. Stolyarov, *Applied Physics*, No. 6, 16 (2020) [in Russian].
4. G. I. Rumyantsev, *Hygiene*. (GEOTAR-Medicine, Moscow, 2001).
5. M. Wacker and M. F. Holick, *Dermato-endocrinology* **5**, 51 (2013).
6. E. V. Nenahova and L. A. Nikolaeva, *Ultrafioletovoe izluchenie. Vliyanie ultrafioletovogo izlucheniya na organizm cheloveka*. (IGMU, Irkutsk, 2020) [in Russian].
7. H. Gu, M. E. Muzeroll, J. C. Chamberlain and J. Maya, *Plasma Sources Sci. Technol.* **10**, 1 (2001).
8. F. G. Baksht, S. V. Gavrish, V. B. Kaplan, S. V. Korotkov, V. F. Lapshin, A. M. Martsinovsky, I. I. Stolyarov and D. V. Christyuk, *Tech. Phys. Lett.* **34**, 1066 (2008).
9. V. I. Babanin, V. B. Kaplan, A. M. Martsinovsky and A. Ya. Ender, *Tech. Phys.* **47**, 1467 (1977).
10. F. G. Baksht, V. F. Lapshin and A. S. Shiman, *Svetotekhnika*, No. 3, 20 (2005).
11. S. V. Gavrish, V. B. Kaplan, A. M. Martsinovsky and I. I. Stolyarov, *Tech. Phys. Lett.* **41**, 694 (2015).