

УДК 621.327

PACS: 07.50.-e

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-503-510

EDN: JQHUG



Исследование характеристик импульсного источника УФ-излучения на основе короткодугового разряда в ксеноне

С. В. Гавриш, С. Г. Киреев, А. О. Потапенко, С. Г. Шашковский

Представлены результаты исследования импульсного короткодугового неограниченного ксенонового разряда высокого давления в качестве источника УФ-излучения. Выполнен теоретический анализ возможности повышения эффективности излучения ксенонового разряда в УФ области спектра, описана конструкция трехэлектродной газоразрядной лампы, изучены электрические, яркостные и спектральные характеристики разрабатываемого источника.

Ключевые слова: импульсный разряд, короткодуговая лампа, ксенон, разрядный контур, апериодический ток, яркость, спектральное распределение излучения.

Введение

Использование излучения ксеноновой плазмы, ограниченной кварцевой оболочкой (колбой), в качестве источника УФ-излучения (газоразрядной лампы) доказало свою эффективность при разработке оптико-электронных систем обеззараживания воздуха и поверхностей [1, 2]. Преимущества импульсной ксеноновой газоразрядной лампы в сравнении с другими источниками УФ-излучения (ртутные лампы низкого и высокого давления, металлогалогенные лампы и т. д.) обусловлены следующими особенностями данного типа разряда:

- непрерывный спектр излучения в области биоцидной активности микроорганизмов 200–300 нм;
- высокие пиковые значения мощности излучения (до 10 кВт/см²) в указанном спектральном диапазоне.

Такие характеристики УФ-излучения при воздействии на живую материю вызывают многоканальное деструктивное воздействие на все жизненно важные структуры клеток (нуклеиновые кислоты, белки, биомембраны и др.) [2].

В то же время для обеспечения перечисленных преимуществ рассматриваемого класса ламп требуется поступление в ксеноновую плазму значительной электрической энергии, что приводит к агрессивному воздействию высокотемпературного разрядного канала на близко расположенную стенку кварцевой оболочки. В результате такого взаимодействия плазмы с колбой наблюдаются следующие негативные последствия, снижающие сроки службы газоразрядной лампы:

- снижение оптической прозрачности кварца из-за испарения контактирующего с плазмой приповерхностного слоя и сдвига УФ границы пропускания в сторону видимого диапазона;
- выделение в плазмообразующую среду паров оксида кремния, что способствует

Гавриш Сергей Викторович, нач. отдела, д.т.н.

E-mail: svgavr@list.ru**Киреев Сергей Геннадьевич**, нач. лаб., к.т.н.E-mail: kireevsg.melitta@gmail.com**Потапенко Алексей Олегович**, н.с.E-mail: l_potapenko99@mail.ru**Шашковский Сергей Геннадьевич**, гл. конструктор, к.т.н.E-mail: melitta916@gmail.com

Научно-производственное предприятие «Мелитта».

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

Статья поступила в редакцию 30.10.2023

После доработки 12.11.2023

Принята к публикации 17.11.2023

© Гавриш С. В., Киреев С. Г., Потапенко А. О., Шашковский С. Г., 2023

трансформации спектра излучения и усиливает эрозию электродов;

- уменьшение механической прочности оболочки за счет образования напряженного кристобалитного слоя на поверхности колбы, обращенной к плазме.

Все перечисленные негативные эффекты приводят к падению эффективности излучения в УФ-диапазоне или являются причиной разрушения газоразрядной лампы при достижении критических значений удельной электрической нагрузки на кварцевую колбу.

Устранить перечисленные проблемы представляется возможным в случае использования в качестве базовой конструкции источника УФ-излучения хорошо известные технические решения импульсных шаровых ламп (строботронов) со свободно расширяющимся разрядом в ксеноне высокого давления (6–10 атм.) [3, 4]. Данный класс газоразрядных ламп был разработан в связи с потребностью в источниках излучения в видимом диапазоне спектра, обладающими высокой частотой следования и стабильностью световых вспышек [4]. Предпосылки использования строботронов в качестве источника УФ-излучения рассматривались в ограниченном числе научных работ [5, 6]. В частности, в статье [5] показано, что при короткой длительности разряда, значительной электрической мощности и значительной яркостной температуре (до 10000 К) возможно получить сплошной спектр излучения и высокую эффективность генерации излучения в спектральном диапазоне 200–300 нм. Таким образом, исследование импульсного ксенонового неограниченного разряда как источника УФ-излучения является актуальной задачей, началу решения которой посвящена данная работа.

Теоретический анализ решаемой задачи

При создании высокоэффективного источника УФ-излучения сплошного спектра необходимо учитывать три основных положения, следующих из научных достижений при создании импульсных шаровых ксеноновых ламп. Во-первых, полученные в работах [3, 6, 7] результаты исследований характеристик строботронов показали, что значительная часть изученных образцов в определенных режимах

эксплуатации удовлетворяют требованиям в части обеспечения непрерывности излучения, а именно, имеют сплошной спектр в широком диапазоне длин волн от 190 до 800 нм. Вопросам повышения КПД излучения в УФ области спектра посвящена работа [6], где по формуле Планка выполнен расчетный анализ спектрального распределения КПД (η_λ) черного цилиндрического излучателя при различных температурах. Из полученных в данной публикации зависимостей $\eta_\lambda = f(\lambda)$ следует, что максимальная величина КПД излучения абсолютно черного тела при определенной длине волны обеспечивается при достижении излучателем температуры, согласно таблице.

Таблица

Длина волны максимума яркостной температуры абсолютно черного тела

T, K	10000	15000	20000	25000	30000
λ, nm	300	200	170	150	140

Из представленных в таблице данных следует, что чем выше температура черного тела, тем в более глубокую УФ-область смещается максимум КПД его излучения и высокую эффективность такого излучателя в спектральном диапазоне 200–300 нм можно получить при температурах в интервале 10000–15000 К, что соответствует данным работы [5]. Важно отметить, что реально наблюдаемое спектральное распределение энергии излучения шаровых ламп отличается (является фрагментом) от спектров излучения самого плазменного столба из-за поглощения коротковолновой части световой энергии окружающими средами, а именно, наполняющим разрядный объем газом, материалом колбы, окружающим воздухом. В частности, ксенон поглощает излучение с длиной волны короче 160 нм, прозрачность лучших сортов кварца наблюдается, начиная с 160 нм, а электровакуумное стекло пропускает только излучение с длиной волны более 300 нм.

Во-вторых, известно [3], что яркость свободно расширяющегося плазменного канала в плотных газах растет с увеличением вкладываемой в разряд электрической мощности P_b , лишь до определенного уровня, определяемого родом рабочего газа. При дальнейшем

росте P_b яркость излучения (и, соответственно, яркостная температура) стабилизируется и перестает зависеть от параметров, повышающих концентрацию энергии в разряде, т. е. наблюдается эффект насыщения яркости. Особенности проявления этого эффекта в мощных импульсных разрядах в газах подробно рассмотрены в [3]. По этой причине в дальнейших исследованиях потребуются оптимизация режимов электрического питания с целью исключения бесполезных потерь P_b с точки зрения эффективности генерации излучения в УФ-области.

В-третьих, из работы [3] следует, что для достижения высоких значений мощности в УФ-диапазоне необходимо вложение в разряд значительной электрической энергии в малый промежуток времени. Согласно [3] работа импульсной короткодуговой лампы в таком режиме приводит к изменению амплитуды и длительности импульса излучения, поэтому требуется тщательно анализировать согласованность сопротивления разрядного канала и электрической цепи питания.

Аппаратное обеспечение исследований

Для проведения экспериментальных работ нами была изготовлена трехэлектродная импульсная шаровая лампа, конструктивное исполнение которой представлено на рис. 1.

Разрядный промежуток источника излучения образован катодом 1 и анодом 2 (основные электроды), выполненными из торированного вольфрама. Для инициирования импульса зажигания ксенонового разряда между основными электродами перпендикулярно плазменному каналу герметично установлен вспомогательный электрод, расположенный на расстоянии 3 мм от оси лампы. Расстояние между катодом и анодом $l_{мэ}$ в экспериментальных образцах ламп составляло 4 и 6 мм, а давление ксенона p_0 , заполняющего разрядную колбу, равнялось 4 и 6,5 атм. В качестве материала оболочки исследуемых ламп использовалось кварцевое стекло с коэффициентом пропускания не менее 50 % при длине волны 190 нм и в спектральном интервале 240–1000 нм более 90 %.

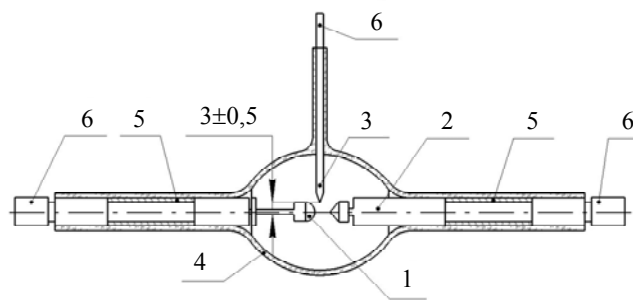


Рис. 1. Конструкция импульсной шаровой лампы: 1 – катод; 2 – анод; 3 – электрод зажигания; 4 – шаровая кварцевая колба; 5 – герметизирующий узел; 6 – токоподводы

Для проведения экспериментальных исследований параметров трехэлектродной импульсной шаровой лампы нами была разработана установка электрического питания и измерения электрофизических характеристик, состоящая из следующих основных блоков (рис. 2):

- разрядный контур, включающий систему заряда (на схеме не показана) накопительного конденсатора C_0 емкостью 4 мкФ до напряжения $U_0 = 1,5\text{--}3,0$ кВ и соединительные провода с величиной общей индуктивности не более 240 нГн;
- модуль инициирования разряда, обеспечивающий подачу на электрод зажигания 3 (рис. 1) высоковольтного импульса напряжения с амплитудой до 30 кВ со вторичной обмотки трансформатора при разряде через его первичную обмотку конденсатора C в момент замыкания ключа K ;
- система измерения электрических параметров лампы, состоящая из делителя напряжения, построенная на параллельно – последовательном соединении емкостей C_1 и сопротивлений R , а также из пояса Роговского ПР, сигнал с которых регистрировался двухканальным осциллографом TDS-1001;
- комплекс регистрации характеристик излучения исследуемых образцов, включающий фотоприемное устройство Π с набором интерференционных фильтров для определения силы излучения в узких спектральных интервалах 270 ± 50 , 430 ± 50 , 555 ± 50 и 1000 ± 70 нм и оптический тракт с линзой O и диафрагмой D для диагностирования яркостной температуры.

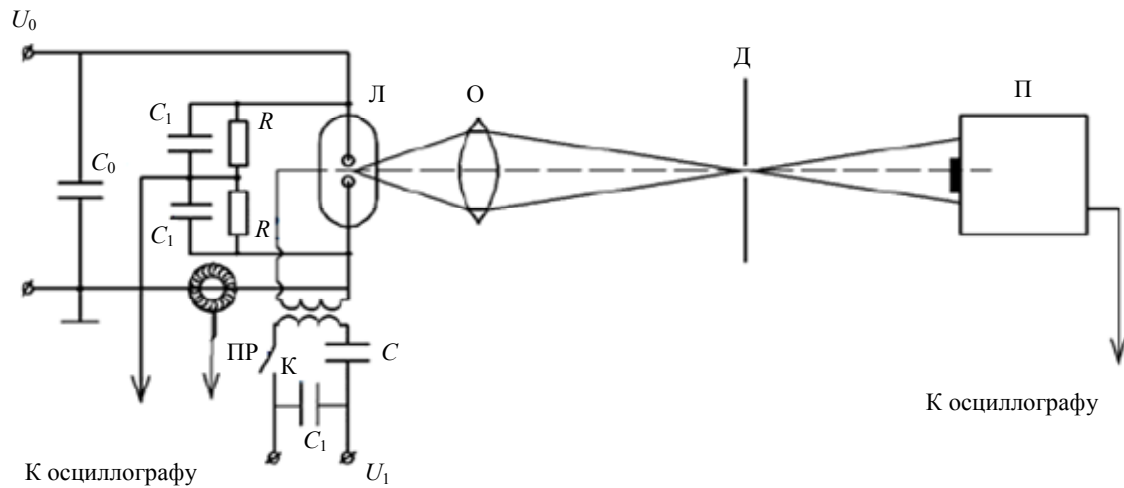


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки. Расшифровка обозначений по тексту

При исследовании электрических характеристик разряда производились измерения осциллограмм импульсов тока и напряжения на лампе, из которых расчетным путем определялись временные зависимости:

- сопротивления лампы R_b ;
- электрической мощности P и энергии E , рассеиваемой в разрядном контуре;
- электрической мощности P_b и энергии E_b , потребляемой лампой.

Для повышения точности измерений нами выполнена оценка сопротивления электродных узлов и получено значение 2–3 мОм, что составляет не более 4 % от величины полного сопротивления газоразрядной лампы R_b , т. е. можно утверждать, что практически вся электрическая мощность из разрядного контура поступает в плазменный канал.

Экспериментальные результаты

Изучение электрических характеристик разряда

Как отмечалось в теоретической части, импульсы тока короткой длительности имеют место при небольших емкостях разрядного контура и малой длине плазменного канала. Короткие всплески получают при небольших емкостях разрядного контура и малых расстояниях между электродами, что приводит, в свою очередь, к низким значениям сопротивления плазменного канала. В этом случае, если R_b меньше суммарного сопротивления

разрядного контура, форма разрядного тока приобретает аperiodический характер. При этом декремент затухания и период колебаний импульса тока зависят от индуктивности L и сопротивления R разрядного контура. В частности, из полученных в наших экспериментах осциллограмм видно, что разрядный ток первой лампы ($p_0 = 4,0$ атм., $l_{мэ} = 4$ мм) имеет четыре ярко выраженных полупериода, тогда как у второй лампы ($p_0 = 4,0$ атм., $l_{мэ} = 4$ мм) наблюдается только две полуволны. Установленное явление связано с улучшением согласования разрядного контура с нагрузкой (лампой) за счет роста сопротивления плазменного канала при увеличении разрядного промежутка и давления ксенона в рабочем объеме импульсной лампы.

Кроме количества колебаний разрядный ток характеризуется различной временной протяженностью полупериодов. Например, в случае первой лампы при напряжении на накопительном конденсаторе $U_0 = 2,5$ кВ длительность τ_1 первого полупериода разряда составляла около 2,69 мкс, при последующих колебаниях τ_1 составляло 2,15 мкс. Наблюдаемые временные различия связаны с энергозатратами на повышение температуры разряда в период первой полуволны, а в остальное время прохождение тока происходит в частично установившемся теплофизическом состоянии плазмы.

Сопротивление газоразрядной лампы оказывает существенное влияние на временной интервал переднего фронта импульса тока,

который определяет эффективность поступления пиковой мощности $P_{\text{пик}}$ в плазменный канал. В частности, время достижения максимума разрядного тока у первой лампы составило 1,84 мкс, в то время как у второго образца возросло до 2,13 мкс. При этом в исследуемых режимах максимум тока возрастает от 0,8 кА ($P_{\text{пик}} = 0,23$ МВт) до 4,4 кА ($P_{\text{пик}} = 1,62$) при варьировании напряжения на накопительном конденсаторе в интервале $0,5 \div 2$ кВ.

В силу того, что исследуемый разряд имеет апериодический временной характер импульса тока [3], то на рис. 3 для упрощения рассмотрения экспериментальных результатов приведены зависимости электрических характеристик в течение его первой полувольты.

Из представленных экспериментальных данных следует:

Во-первых, в момент подачи на разрядный промежуток инициирующего импульса зажигания сопротивление отрезка между основными электродами составляет 10–30 Ом,

но уже по истечении 1 мкс R_b падает до величины 0,1 Ом. Именно высокое проводящее состояние плазменного канала формирует колебательный характер тока, причина которого рассмотрена в теоретической части статьи.

Во-вторых, при оценке поступающей в разряд за полупериод импульса тока энергии получена величина 4,2 Дж (рис. 3), что соответствует 67 % от энергии заряда накопительного конденсатора. В то же время КПД преобразования вкладываемой в разряд энергии в излучение за все время прохождения импульса тока достигает значения 92 %, что свидетельствует о хорошей согласованности параметров разрядного контура с сопротивлением плазменного канала. Этот результат вытекает из практически полного совпадения электрических мощностей в разрядном контуре и на лампе (кривые 3 и 4 на рис. 3), что связано, в свою очередь, с незначительными потерями при передаче энергии из электрической цепи в газоразрядный прибор (кривые 5 и 6).

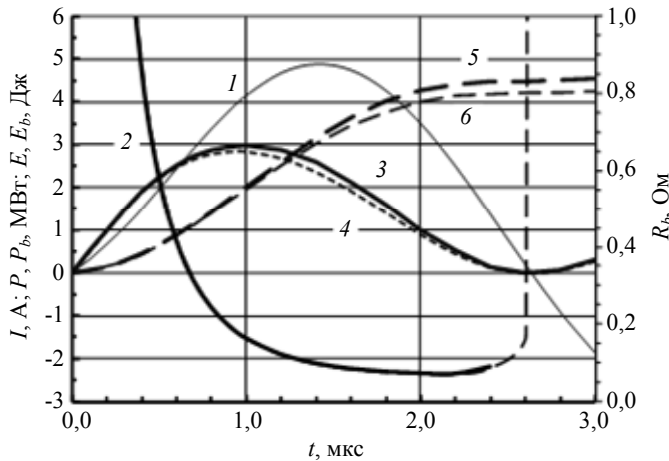


Рис. 3. Временные зависимости разрядного тока (1), сопротивления лампы (2), электрическая мощность, поступающая в контур (3) и лампу (4), потери энергии в разрядной цепи (5) и плазменном канале (6)

В результате исследований всех электрических характеристик установлено, что описанные электрические режимы испытаний характеризуются высокой энергонагруженностью трехэлектродной лампы, т. е. максимальные значения тока достигают от 2,5 до 6,2 кА при времени нарастания импульсов тока в несколько микросекунд, а пиковые величины электрической мощности разряда находятся в интервале 1,1–3,3 МВт.

Исследование спектрально-энергетических характеристик разряда

Согласно работам [1, 2] биоцидная эффективность воздействия импульсного ксенонового разряда на микроорганизмы тем выше, чем больше мощность излучения в диапазоне длин волн 200–300 нм. Одним из факторов, определяющих КПД излучения в требуемом спектральном диапазоне, является яркость импульсного ксенонового разряда V_b . В свою

очередь в работе [3] показано, что максимальную яркость неограниченного плазменного канала можно достичь при увеличении электрической мощности газоразрядной лампы. Однако рост P_b дает эффект повышения яркости до определенной величины, далее происходит насыщение зависимости $B_b = f(P_b)$, т. е. достигается так называемая предельная яркость $B_{b, \text{пред}}$. Для момента достижения 90 % предельной яркости авторами работы [3] установлена зависимость напряжения на рабочем конденсаторе $U_{0,9}$ от параметров разрядного контура:

$$U_{0,9} \approx \frac{152}{A} \left(\frac{L \times I_{\text{мэ}}}{p_0 \times C_0} \right)^{0,25}$$

где A – атомная масса рабочего газа; $I_{\text{мэ}}$ – межэлектродное расстояние; p_0 – давление инертного газа; C_0 и L – емкость и индуктивность разрядного контура.

Выполненная нами по формуле оценка рабочего напряжения на накопительном конденсаторе, при котором достигается $B_{\text{пред}}$, составила величину $U_0 = 1,5$ кВ.

Полученный результат, частично нами подтвержден при исследовании зависимости яркости в области длины волны 270 ± 50 нм от напряжения на накопительном конденсаторе, показанной на рис. 4.

Как видно из представленных экспериментальных данных в интервале напряжений 1,2–1,5 кВ начинает проявляться эффект насыщения яркости. Наблюдаемое некоторое несоответствие с расчетной величиной U_0 связано с тем, что эмпирическое уравнение (1) получено для излучения в видимом диапазоне, где коэффициент оптического поглощения ксеноновой плазмы существенно выше. Тем не менее, эффект насыщения при температурах 22000–24000 К явно наблюдается, причем увеличение давления ксенона и межэлектродного расстояний позволяет достичь более высоких яркостных температур. При росте яркостных температур максимум излучения, в приближении абсолютно черного тела, смещается в спектральную область 110–160 нм (см. таблицу), что может быть малоэффективным для бактерицидных ламп, ввиду существенного поглощения ксеноном и кварцем излучения с длиной волны короче 160 нм.

Для проверки эффективности излучения опытных образцов ламп в интервале 200–300 нм нами выполнены спектральные исследования экспериментальных ламп в диапазоне 200–1000 нм. На рис. 5 представлено спектральное распределение усредненных значений плотности энергии излучения ксенонового разряда экспериментальных образцов газоразрядных ламп.

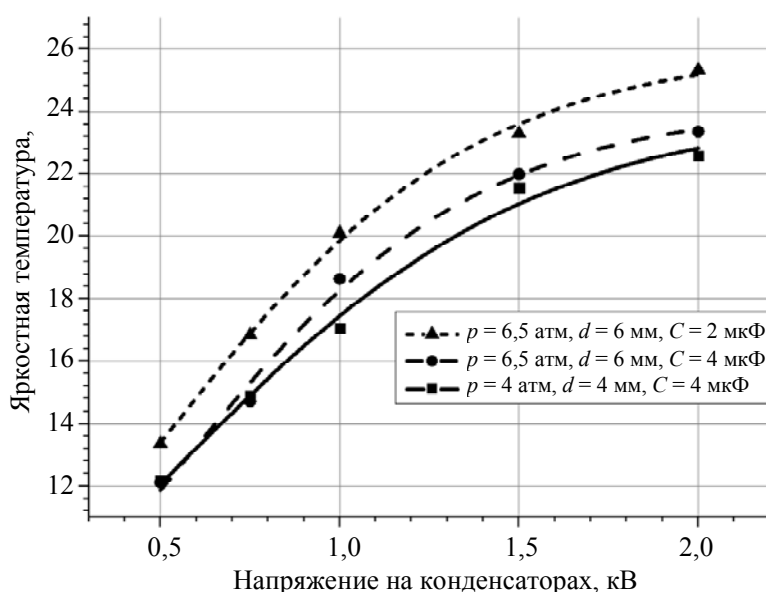


Рис. 4. Зависимость яркостной температуры от напряжения на лампе

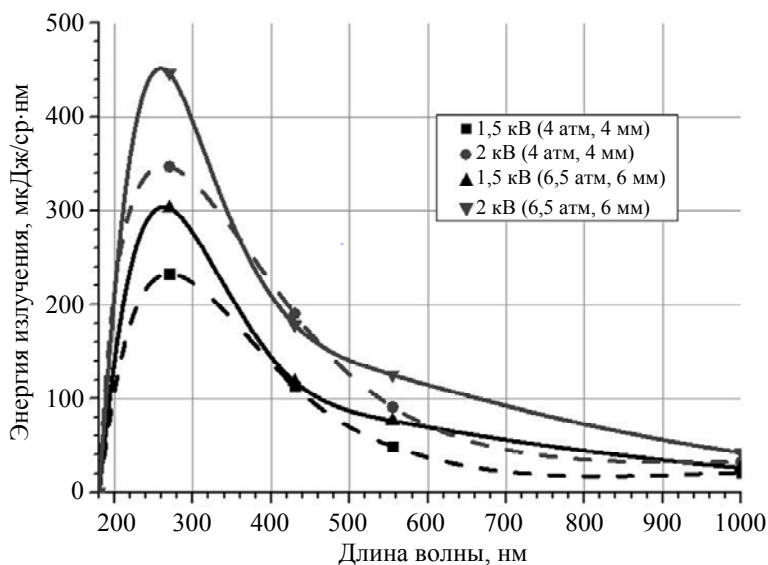


Рис. 5. Спектральное распределение плотности энергии излучения в зависимости от напряжения на лампе и давления ксенона в разрядном объеме

Из рис. 5 следует, что спектральное распределение плотности энергии излучения при изменении запасаемой в накопительном конденсаторе энергии от 0,5 до 1,1 Дж хорошо описывается в приближении абсолютно черного тела. Увеличение энергии приводит к появлению ярко выраженного максимума в спектральной области 250–300 нм, что свидетельствует о высокоярком характере излучения разряда.

Сопоставление рис. 4 и 5, а также сделанные теоретический анализ и изучение полученных экспериментальных данных позволяет сделать заключение, что в качестве базовой конструкции импульсной короткодуговой лампы следует принять вариант с межэлектродным расстоянием 6 мм, давлением ксенона до 6 атм., работающим в разрядном контуре в диапазоне рабочих напряжений до 2 кВ. В данной работе приведены первые результаты исследований, направленных на создание источника УФ-излучения на основе неограниченного разряда в ксеноне с повышенной эффективностью излучения в спектральном диапазоне 200–300 нм. Показано, что для

достижения высокого КПД УФ-излучения необходимо повышать электрическую мощность разряда, что ставит новые задачи по изучению теплофизического состояния элементов конструкции лампы, вопросов надежного зажигания и обеспечения долговечности работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев А. Ю., Борисевич С. В., Масыкин Д. Н. и др. / Медицинский алфавит. 2020. № 18. С. 55–58.
2. Гольдштейн Я. А., Голубцов А. А., Шашковский С. Г. / Поликлиника. 2014. № 3. С. 51–54.
3. Маршак И. С. Импульсные источники света. — М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.
4. Луцет Б. Я., Самодергин В. А., Щукин Л. И. / Обзоры по электронной технике. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1975. № 4 (287). С. 57.
5. Камруков А. С., Кулебякина А. И. / Тезисы докладов XXXVI Международ. Звенигородская конф. по физике плазмы и УТС. — Звенигород, 9–13 февраля 2009. С. 198.
6. Гаврилова Л. И., Гребеньков В. С., Дойников А. С. и др. Импульсная фотометрия. — Л.: Машиностроение, 1978. Вып. 5. С. 145–151.
7. Данильченко А. М., Луцет Б. Я., Самодергин В. А. и др. / Обзоры по электронной технике. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1978. № 1 (522). С. 35.

Investigation of the characteristics of a pulsed UV radiation source based on an unlimited short-arc discharge in xenon

S. V. Gavrish, S. G. Kireev, A. O. Potapenko and S. G. Shashkovsky

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

Received 30.10.2023; revised 12.11.2023; accepted 17.11.2023

The paper presents the results of a study of a pulsed short-arc unlimited high-pressure xenon discharge as a source of UV radiation. A theoretical analysis of the possibility of increasing the efficiency of xenon discharge radiation in the UV region of the spectrum is performed, the design of a three-electrode gas discharge lamp is described, the electrical, brightness and spectral characteristics of the source being developed are studied.

Keywords: pulse discharge, short-arc lamp, xenon, discharge circuit, aperiodic current, brightness, spectral distribution of radiation.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-6-503-510

REFERENCES

1. Zverev A. Yu., Borisevich S. V., Masyakin D. N. et al., Medical alphabet, № 18, 55–58 (2020).
2. Goldstein Ya. A., Golubtsov A. A. and Shashkovsky S. G., Polyclinic, № 3, 51–54 (2014).
3. Marshak I. S., Pulsed light sources, Moscow–Leningrad, Gosenergoizdat, 1963.
4. Lutset B. Ya., Samodergin V. A. and Shchukin L. I., Reviews on electronic technology. Ser. Electro-vacuum and gas-discharge devices, № 4 (287), 57 (1975).
5. Kamrukov A. S. and Kulebyakina A. I. Abstracts of the XXXVI International reports. Zvenigorod Conference on Plasma Physics and TCB. Zvenigorod, February 9–13, 2009, p. 198.
6. Gavrilova L. I., Grebenkov V. S., Doynikov A. S. et al., Pulsed photometry, Leningrad, Mechanical engineering, 1978, release 5, pp. 145–151.
7. Danilchenko A. M., Lutset B. Ya., Samodergin V. A. et al., Reviews on electronic technology. Ser. Electro-vacuum and gas-discharge devices, № 1 (522), 35 (1978).