УДК 621.327.7 EDN: ATXBLV

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ КАПИЛЛЯРНОГО РАЗРЯДА ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАМПЫ

С.В. Гавриш gsv@melitta-uv.ru
П.А. Чиликина mail@melitta-uv.ru
С.Г. Шашковский shasg@melitta-uv.ru

ООО «НПП «Мелитта», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Исследована зависимость характеристик УФ-излучения от конструкторских параметров импульсных ламп с кварцевой оболочкой на основе капиллярного разряда в инертных газах. Для решения ряда экологических, медицинских и биологических задач выполнен расчет яркостной температуры разряда, обеспечивающей максимальную эффективность излучения в бактерицидном диапазоне 200…300 нм, которая составила 11 600 К. Проведен теоретический анализ факторов, определяющих энергию излучения плазменного канала в УФ-диапазоне спектра. Подробно изучены различные составы наполнения лампы. На основе расчета теплопроводности плазмообразующей среды и математической модели импульсного разряда доказано преимущество применения ксенона в качестве рабочего газа. Рассмотрены конструкция и условия электрического питания капиллярных ламп. В результате варьирования диаметра капилляра, давления наполнения и напряжения накопительного конденсатора удалось достичь яркостной температуры 15 700 К для разрядного объема диаметром 3 мм при давлении ксенона 220 мм рт. ст. В ходе спектральных исследований установлено, что при энергии разряда 50 Дж генерация излучения происходит исключительно в ксеноновой плазме, испарения кварцевой оболочки не наблюдается, а доля излучения в бактерицидной области приближается к 50 % общего энергетического потока в спектральном диапазоне 200…900 нм

Ключевые слова

Импульсный разряд, капилляр, ксенон, УФ-излучение, яркостная температура, бактерицидный диапазон, разрядный контур

Поступила 18.06.2026
Принята 17.08.2026
© Автор(ы), 2026

Введение. Современный прогресс в области источников излучения на основе импульсного разряда в инертных газах (например, импульсных газоразрядных ламп) сделал новый виток своего развития. В настоящее время доказана эффективность применения импульсных газоразрядных ламп в плазменно-оптических УФ-технологиях для решения экологических и медико-биологических задач вместо их традиционного использования в качестве источника света в лазерных и оптических приборах различного назначения [1–5]. Например, в серийно выпускаемых ООО «НПП «Мелитта» оптико-электронных системах обеззараживания воздуха и поверхностей применяется импульсная трубчатая ксеноновая лампа ФП 05/120, которая при работе в разрядном контуре (C_0 = 60 мкФ, U_0 = 1,4 кВ) обеспечивает эффективность энерговклада в ксеноновую плазму не менее 93 %, что позволяет получить УФ-излучение сплошного спектра с пиковой мощностью до 30 кВт [6, 7].

При исследованиях указанной импульсной лампы установлено, что ее относительная спектральная яркость B_λ удовлетворительно описывается в приближении абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой T = 7500 К, максимум спектральной яркости приходится на длину волны 365 нм, что не соответствует наиболее актуальным биоцидному ($\Delta\lambda$ = 200…280 нм) или бактерицидному ($\Delta\lambda$ = 200…300 нм) спектральным диапазонам [5, 6]. Зависимости относительной спектральной яркости серийной лампы ФП-05/120 и АЧТ от длины волны при разных температурах приведены на рис. 1.

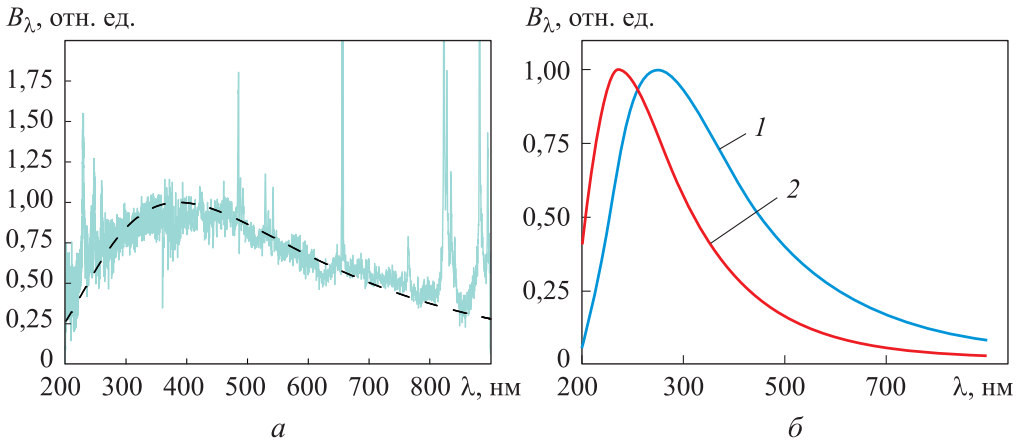


Рис. 1. Зависимости относительной спектральной яркости B_λ серийной лампы ФП-05/120 (—) и АЧТ (—) от длины волны λ при T = 7500 (*а*); 11 600 (*1*), 16 500 К (*2*) (*б*)

Для решения возникшей проблемы в [8] выполнена расчетная оценка относительной спектральной интенсивности излучения АЧТ при различных температурах. Спектральные характеристики излучения АЧТ при двух значениях температуры приведены на рис. 1, *б*. При увеличении температуры разряда длина волны экстремума энергии излучения сдвигается в более коротковолновую область УФ-диапазона. В частности, температура АЧТ с максимумом излучения в середине спектрального диапазона высокой биоцидной активности 200…300 нм составляет 11 600 K.

Согласно [1, 9, 10], высокие температуры и яркости импульсного газового разряда могут быть достигнуты при выделении в плазменном канале больших плотностей энергии. Для этого необходимо либо увеличить сопротивление плазменного канала, повысив давление наполнения лампы, либо ограничить область, в которой формируется разряд.

В случае прямой импульсной лампы практическая реализация сводится к уменьшению (< 4 мм) внутреннего диаметра разрядной трубки, т. е. к получению так называемого высокотемпературного капиллярного разряда, ограниченного кварцевой оболочкой [1, 11]. Выполненные в [8, 12] предварительные экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения такого технического решения. Полученные результаты относятся к единичным образцам импульсных ламп и не предусматривают подробного выявления зависимостей характеристик УФ-излучения от конструктивных параметров (внутреннего диаметра оболочки, состава и давления рабочего газа) и режимов работы (напряжения и емкости разрядного контура, частоты следования импульсов и т. д.). В связи с этим авторы считают актуальной задачей продолжение исследований, начатых в [8, 12].

Цель настоящей работы — выявить посредством расчетно-теоретического анализа и комплекса экспериментальных исследований конструктивные параметры разрядного объема (конфигурацию, диаметр, состав и давление газового наполнения) для определения базового варианта импульсной капиллярной лампы с максимальным энергетическим потоком УФ-излучения в спектральной области 200…300 нм.

Материалы и методы. Для сужения области экспериментального поиска эффективных конструкции и режимов работы лампы необходимо проанализировать основные достижения в области импульсных ламп, основанных на капиллярном разряде в инертных газах, и сделать некоторые расчетные оценки.

Теоретический анализ решаемой задачи. В результате многочисленных исследований импульсного разряда выявлено [1], что при достаточной мощности электрического источника, поддерживающего разряд в газовом

промежутке, после формирования ионизированного канала возникает квазистационарная стадия. Особенность данного состояния разряда заключается в том, что, будучи по своей физической природе вполне устойчивой формой плазменного столба, он требует для своего питания таких больших мощностей, которые могут быть рассеяны в межэлектродном пространстве только при разряде накопительного конденсатора. В связи с этим в дальнейших исследованиях для электрического питания импульсных ламп будем использовать разрядный контур.

Согласно данным из [1], в отличие от форм стационарного разряда, в которых свободный пробег электронов определяется поперечным сечением нейтральных атомов [2, 13], плазма мощного импульсного разряда настолько сильно ионизирована, что свободный пробег электронов определяется в ней в основном поперечным сечением ионов. Если для обычных форм разряда плотность тока пропорциональна степени ионизации газа, сильно зависящей от рода и давления газа, электрического градиента и других параметров [2, 13], то для мощного импульсного разряда плотность тока почти не зависит от степени ионизации. Вследствие этого можно указать на своеобразное «насыщение» разряда. Поскольку поперечное сечение однократно заряженного иона, имеющего кулоновское поле избыточного заряда атомного ядра, одинаково для всех атомов, плотность тока в квазистационарной стадии канала «насыщенного» разряда слабо зависит от рода и давления газа [1, 11].

Плазма в квазистационарной стадии насыщенного разряда находится в состоянии, близком к термодинамическому равновесию, для которого характерны следующие особенности. Плазма имеет довольно высокий показатель поглощения собственного излучения (обычно порядка 1 $см^{-1}$), вследствие чего излучение разряда в значительной мере происходит за счет рекомбинации электронов и ионов плазмы и торможения электронов в поле ионов, которые образуют сплошной спектр. Распределение излучения по спектру определяется структурой атомов газа и температурой ионизированного канала. Именно по этой причине исследования по повышению интенсивности УФ-излучения нацелены на увеличение температуры разряда.

Энергетический баланс плазмы в квазистационарной стадии разряда в общем виде может быть описан уравнением Эленбааса — Геллера [1], составными частями которого являются потери за счет теплопроводности и излучения плазмообразующей среды. Таким образом, основная задача настоящей работы — увеличение выхода излучения (в УФ-диапазоне) и уменьшение потерь за счет теплопроводности путем выбора конструк-

тивного исполнения импульсной лампы (диаметра, межэлектродного расстояния, рода и давления наполнения).

Сложность поставленной задачи заключается в том, что выбор в качестве источника излучения капиллярного разряда приводит к дополнительным трудностям, а именно вследствие уменьшения диаметра межэлектродного промежутка усиливается влияние внутренней стенки оболочки импульсной лампы, тем самым усиливается неравновесность плазмы. В связи с этим для достижения поставленной цели необходимо найти оптимальные размеры плазменного канала.

Методика измерений и экспериментальная установка. Для реализации поставленных целей по типовой технологии изготовлена серия импульсных ламп с диаметрами капиллярного канала d = 2, 3 и 5 мм, при заполнении межэлектродного пространства ксеноном под давлением p = 220, 300, 350 и 400 мм рт. ст. Конструктивное исполнение образца исследуемой лампы приведено на рис. 2.

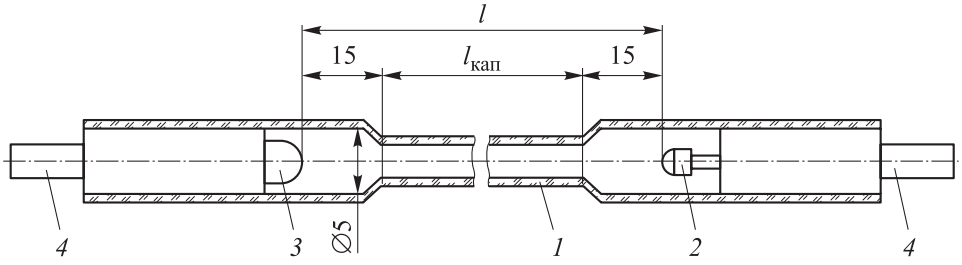


Рис. 2. Конструктивное исполнение образца исследуемой лампы:
1 — капилляр; *2* — катод; *3* — анод; *4* — токоввод; l — межэлектродное расстояние; $l_{кап}$ — длина капиллярного участка

Исследования яркостной температуры, спектрально-энергетических и электрических характеристик ксенонового разряда, ограниченного капилляром из кварцевого стекла, проведены на экспериментальных образцах импульсных ламп. Для аппаратного обеспечения испытаний разработаны экспериментальный стенд (рис. 3), включающий в себя источник электрического питания лампы с возможностью регистрации осциллограмм тока и напряжения, и измерительный комплекс для регистрации УФ-характеристик излучения ксенонового разряда. Блок-схема экспериментального стенда для исследования электрических и спектрально-энергетических характеристик излучения импульсных ламп приведена на рис. 3.

Для регистрации осциллограмм тока и напряжения использовали токовый трансформатор и малоиндуктивный делитель напряжения смешанного типа, электрические сигналы которых фиксировали посредством

осциллографов. Характеристики УФ-излучения экспериментальных ламп исследовали с помощью спектрометра с распределением энергии излучения в диапазоне длин волн 200…900 нм и интегрирующего фотодатчика на основе фотодиода UV sensor TOCON с эффективным диапазоном спектральной чувствительности 237…267 нм. Источник электрического питания, входящий в состав стенда, позволял проводить эксперименты в широком диапазоне энергий разряда вследствие плавного регулирования напряжения на накопительном конденсаторе и применения разрядных конденсаторов различной емкости. Для регистрации характеристик излучения плазменного канала определенного диаметра применяли специальную диафрагму, позволяющую выделять требуемый участок разрядной трубки путем экранирования остальной части межэлектродного расстояния. Обработку электрических и спектрально-энергетических характеристик импульсных ксеноновых ламп на основе капиллярного разряда проводили по методике [6–9, 12].

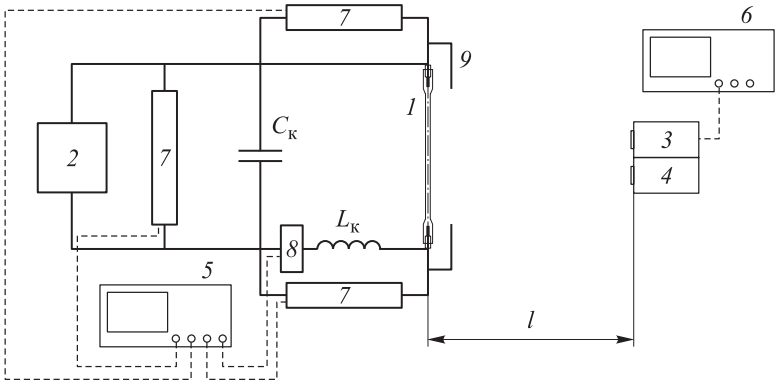


Рис. 3. Блок-схема экспериментального стенда для исследования электрических и спектрально-энергетических характеристик излучения импульсных ламп:
1 — испытываемая лампа; *2* — источник электрического питания; *3* — спектрометр AvaSpec-ULS2048CL; *4* — УФ-фотоприемник; *5*, *6* — осциллографы Tektronix TDS-2014C; *7* — делитель напряжения смешанного типа Pintek HVP-39Pro; *8* — токовый трансформатор (пояс Роговского); *9* — диафрагма; $C_к$ — накопительный конденсатор; $L_к$ — индуктивность контура; l — расстояние от излучателя до фотоприемных устройств (l = 1,5 м)

Результаты и их обсуждение. Исследования выполняли на основе комплексного подхода, включающего в себя расчетно-теоретический анализ состава наполнения, экспериментальное изучение влияния на спектрально-энергетические характеристики конструктивных параметров импульсной лампы на основе капиллярного разряда в выбранной плазмообразующей среде.

Расчетные и экспериментальные исследования по выбору состава наполнения. Характеристики излучения импульсных ламп сложным образом зависят от конструктивных данных (диаметра и длины межэлектродного пространства, размеров балластной заэлектродной области, давления рабочего газа и др.) и параметров разрядного контура (напряжения и емкости накопительного конденсатора, индуктивности и сопротивления цепи питания и др.). Некоторые из перечисленных параметров применительно к капиллярному разряду и эффективности генерации УФ-излучения импульсной лампой будут рассмотрены далее.

Выбор состава плазмообразующей среды. Вопрос о возможности повышения эффективности УФ-излучения импульсного разряда посредством использования различных плазмообразующих сред в трубчатых лампах рассматривался, например в [1, 3, 14–16]. При этом предлагалось в составе наполнения лампы использовать как чистые инертные газы (ксенон, гелий, неон, криптон, аргон), так и их смеси в различных комбинациях (Xe–He, Xe–Ne, Xe–Kr, Xe–Ar, Kr–Ne). В частности, в [3, 14] утверждается, что в случае введения в разряд смесей ксенон–криптон (50 % Xe–50 % Kr) интенсивность излучения лампы в спектральном диапазоне 220…350 нм увеличивается в 1,09 раза по сравнению с ксеноновым наполнением, при использовании комбинации ксенон–аргон (70 % Xe–30 % Ar) УФ-поток из плазмы увеличивается в 1,24 раза. Однако, приведенные данные не согласуются с результатами [16], где указано, что смеси инертных газов в составе наполнения разрядного объема не дают существенного эффекта при работе импульсной лампы.

Кроме того, в публикациях не рассматривается вопрос о долговечности предлагаемых вариантов ламп. Понятно, что недостаточно получить высокую эффективность в начальный период работы лампы, важно определить, как теплопроводность плазмообразующей среды $\lambda_{п.с}$ будет влиять на деградацию электродов и разрядной оболочки (испарение и рекристаллизацию внутреннего поверхностного слоя разрядной трубки) и, как следствие, эти процессы окажут влияние на уменьшение интенсивности УФ-излучения в течение срока службы. Таким образом, возникает необходимость проанализировать возможные варианты наполнения межэлектродного пространства с позиций температурной зависимости их теплопроводности.

Для решения данной задачи применен метод, основанный на использовании теплоемкостей химических элементов при постоянном объеме и коэффициентов динамической вязкости компонентов газовой смеси, который приведен в [17] применительно к анализу теплопроводности трехкомпонентной (Cs–Hg–Xe) смеси. Реализация доработанной матема-

тической модели позволила получить температурные зависимости теплопроводности разного рода инертных газов и их смесей в различном процентном соотношении компонентов. Зависимости теплопроводности газовых смесей от температуры для смесей инертных газов Xe–Kr (*а*) и Xe–Ar (*б*) приведены на рис. 4.

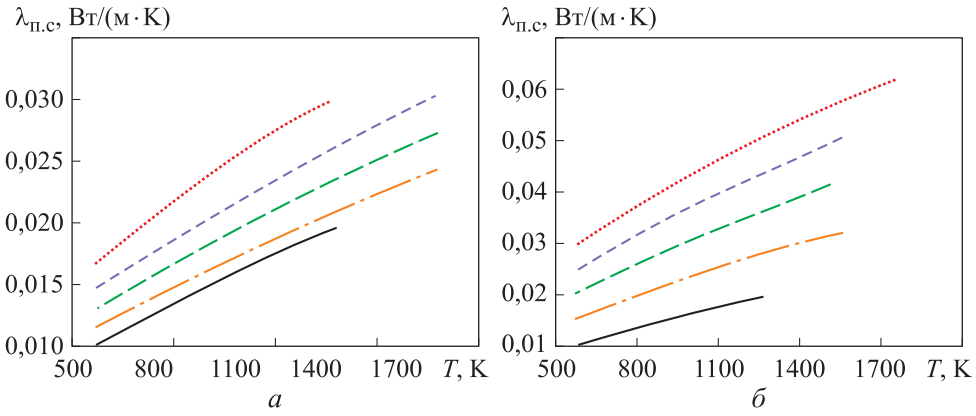


Рис. 4. Зависимости теплопроводности от температуры для смесей инертных газов:

а — 25 % Xe, 75 % Kr (– – –); 50 % Xe, 50 % Kr (— —); 75 % Xe, 25 % Kr (—·—); Xe (——); Kr (·····); *б* — 25 % Xe, 75 % Ar (– – –); 50 % Xe, 50 % Ar (— —); 75 % Xe, 25 % Ar (—·—); Xe (——); Ar (·····)

Согласно приведенным на рис. 4 графическим данным, можно сделать два важных вывода (применительно к наполнению капиллярных ламп).

1. Из всех исследованных составов наполнения разрядного объема лампы (смесь ксенон–неон не приведена на рис. 4) ксенон имеет самую низкую теплопроводность. Причем с повышением температуры разность в значениях $\lambda_{п.с}$ для ксенона и других газов только увеличивается. Например, из рис. 4, *б* следует, что при повышении температуры от 600 до 1300 K теплопроводность ксенона увеличивается на 0,01 Вт/(м · K), а аргона при тех же тепловых изменениях — на 0,02 Вт/(м · K).

2. Зависимости, приведенные на рис. 4, позволяют сделать заключение, что чем больше содержание основного газа в составе наполнения разрядного объема, тем ближе $\lambda_{п.с}$ к его теплопроводности как индивидуального вещества. В связи с этим при необходимости заполнить лампу смесью инертных газов предпочтение лучше отдать ксенону с небольшой добавкой криптона (рис. 4, *а*).

Рассмотрим влияние негативных последствий увеличения теплопроводности плазмообразующей среды на характеристики импульсных ламп

короткой длительности на примере разряда, в котором в качестве основного компонента наполнения используется ксенон.

1. Радиальный температурный профиль разряда $T_р$ в ксеноне представляет собой достаточно пологий участок (от $1{,}5 \cdot 10^4$ до 10^4 K) с резким падением до 4000 K в пристеночной зоне шириной примерно $r/R = 0{,}3$ (r, R — текущий и внутренний радиусы разрядной трубки) [18]. Наблюдаемая столь высокая мгновенная температура при максимуме тока приводит к испарению оксидов кремния с внутренней поверхности оболочки. В результате попадания паров оксидов кремния в чисто ксеноновый разряд увеличиваются примерно в 2 раза кондуктивные потери [18] из-за увеличения теплопроводности образовавшейся парогазовой смеси. В результате осевая температура разряда снижается и, соответственно, уменьшается энергетический выход УФ-излучения. Если в разряд ввести еще один более теплопроводящий компонент, то описанное явление только усилится.

Отметим, что процессы деградации оболочки существенно усилятся при переходе к капиллярному разряду, у которого радиальный профиль температуры будет обеспечивать более высокие тепловые нагрузки на внутреннюю поверхность оболочки по мере уменьшения диаметра плазменного канала. В качестве доказательства можно привести результаты тепловизионных исследований импульсной ксеноновой лампы с трехступенчатой разрядной трубкой, у которой межэлектродный промежуток разбит на три последовательно расположенных участка длиной 30 мм каждый с различными диаметрами (3, 5 и 7 мм). Подробно конструктивное исполнение экспериментальной лампы приведено в [8], а методика пирометрических измерений — в [19]. Такое техническое решение позволило оценить температуру центра каждого сегмента при единой мощности лампы 200 Вт. В результате температура колбы повышается в следующей последовательности 340…350 °C (d = 7 мм), 440 °C (d = 5 мм), 700…710 °C (d = 3 мм). В последнем случае испарение кварца даже в случае разряда в ксеноне весьма вероятно, но требует экспериментальной проверки применительно к рассматриваемому энергетическому режиму работы.

2. Появление паров оксидов кремния отрицательно скажется на работе электродов, т. е. произойдет «отравление» их рабочей поверхности и увеличение работы выхода эмиссионного материала и, как следствие, усилится распыление металлов на поверхность оболочки.

3. Увеличение теплопроводности плазмообразующей среды неизбежно приведет к увеличению тепловой нагрузки на рабочую часть электрода, что

опять будет способствовать усилению распыления эмиттера. В пользу данного утверждения можно привести полученное в [20] уравнение, описывающее длину свободного пробега λ молекулы эмиссионной добавки в инертном газе:

$$\lambda = \frac{1}{\pi n_2 \left(\frac{\sigma_1}{2} + \frac{\sigma_2}{2} \right)^2 \sqrt{1 + \frac{m_1}{m_2}}},$$

где n_2 — удельная концентрация инертного газа; σ_1, m_1 и σ_2, m_2 — эффективное газокинетическое сечение и масса молекулы эмиссионной добавки и молекулы инертного газа. Из приведенного выражения следует, что чем тяжелее газ, тем на меньшее расстояние L от рабочей поверхности электрода распылится эмиссионный материал. В доказательство сделанного предположения изготовлены импульсные лампы, заполненные различными газами: аргоном (m_{Ar} = 39,9), криптоном (m_{Kr} = 83,8) и ксеноном (m_{Xe} = 131,3) при давлении 220 мм рт. ст., и проведены испытания на срок службы. Зависимости энергии УФ-излучения ($W_{УФ}$) импульсных ламп с различным наполнением от срока службы и внешний вид катодной области после окончания наработки приведены на рис. 5. Энергия излучения в спектральном диапазоне 200…300 нм приведена в относительных единицах, т. е. в долях начального значения интенсивности УФ-излучения.

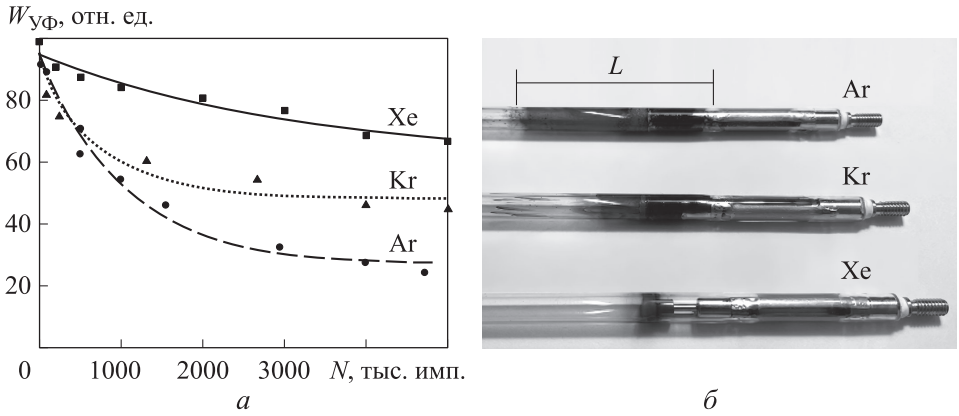


Рис. 5. Зависимости энергии УФ-излучения импульсных ламп с различным наполнением от срока службы (*а*); внешний вид катодной области (*б*) после окончания наработки

Согласно полученным результатам, чем легче инертный газ, тем большую длину L имеет напыленный слой (рис. 5, *б*), что приводит к затемнению части разрядной оболочки и снижению выхода УФ-излучения.

Из рис. 5, *а* следует, что наибольший срок службы, т. е. способность поддерживать энергию УФ-излучения на регламентированном техническими документами уровне, имеют лампы на основе разряда в ксеноне. Отметим, что зависимости на рис. 5, *а* связаны не только с эрозией электродов, но и с деградацией оболочки, обусловленной указанными причинами.

Для окончательного утверждения выбора в пользу ксенонового наполнения использовали разработанную профессором В.М. Градовым (МГТУ им. Н.Э. Баумана) математическую модель импульсного разряда в инертном газе, ограниченном кварцевой оболочкой. Физические процессы в исследуемом типе импульсного разряда протекают в условиях, близких к локальному термодинамическому равновесию. Упрощения в расчетном описании плазмы при таком допущении позволили использовать равновесные функции распределения тяжелых частиц по уровням энергии, электронов — по скоростям, а ионизационный состав определять из соотношений равновесной термодинамики.

Реальный вычислительный эксперимент требует полной и надежной базы данных по широкому кругу характеристик элементов систем и применяемых материалов. Использованная в настоящей работе база данных состоит из множества подсистем, среди которых центральное место занимает подсистема, связанная с информационным обеспечением моделирования процессов в плазме, включающая в себя массивы цифровой информации по материальным функциям плазмы (квантово-механическим характеристикам частиц, статическим суммам по состояниям, термодинамическим, теплофизическим, оптическим свойствам и др.).

Кроме подсистемы, обслуживающей моделирование разрядов, дополнительно необходимы массивы данных, поставляющие информацию по радиационным и теплофизическим свойствам материалов и поверхностей оболочек ламп. В состав соответствующих данных входят спектральные коэффициенты поглощения, преломления и рассеяния оптического материала при различных температурах, спектральные коэффициенты поглощения, преломления и отражения поверхностей с учетом их состояния, температурные зависимости коэффициентов теплопроводности материалов, степени черноты поверхностей и др. Эта часть общей базы компьютерных данных, сформированной в МГТУ им. Н.Э. Баумана, пополняется и обновляется из различных литературных источников. Некоторые данные для удобства хранения и последующего использования аппроксимируются аналитическими зависимостями. Подробно алгоритм вычислительного эксперимента, методология формирования базы данных теплофизических и оптических характеристик плазмы инертных газов приведены в [21–25].

Расчет проводился для ламп с диаметром разрядного промежутка 5 мм и длиной плазменного канала 120 мм. Предполагалось, что разрядный объем заполнялся ксеноном или криптоном при давлении 100…400 мм рт. ст., а импульсная лампа работала при приложении прямоугольного импульса напряжения с амплитудой 120 В с переменной частотой 10…1000 Гц. Несмотря на то, что в этих условиях плазменные процессы не совсем соответствуют форсированной ионизации при разряде накопительного конденсатора, тем не менее, качественная сравнительная оценка средней мощности УФ-излучения $P_{УФ}$ показывает преимущество ксенонового наполнения (табл. 1).

Таблица 1

Мощность УФ-излучения, Вт, импульсных ламп с наполнением ксеноном и криптоном

Наполнение	Частота токовых импульсов f, Гц				
	10	30	50	500	1000
Ксенон	3,2	9,6	16,0	160	320
Криптон	2,9	8,7	14,5	145	290

Это преимущество (10 %) сохраняется с увеличением частоты следования токовых импульсов. Таким образом, по результатам проведения серии расчетных и экспериментальных исследований принято решение — дальнейшие экспериментальные работы сосредоточить на капиллярном разряде в ксеноне.

Изучение влияния давления наполнения и размеров разрядного объема на эффективность генерации УФ-излучения. Основное внимание сфокусировано на влиянии диаметра плазменного канала, давления ксенона в разрядном объеме и энергии, вкладываемой в капиллярный разряд, на эффективность генерации УФ-излучения.

Исследование спектрально-энергетических характеристик излучения капиллярного разряда в ксеноне. Спектральный состав излучения большинства импульсных трубчатых ламп с длительностью в сотни микросекунд характеризуется значительной долей энергии в видимом диапазоне длин волн [1, 2, 10, 11]. Переход к разряду, когда в короткий промежуток времени (< 100 мкс) в плазму вкладывается значительная энергия (так называемый жесткий режим [26]), способствует увеличению КПД излучения ксенонового разряда в УФ-диапазоне [3, 14, 27, 28]. В частности, в ходе исследований лампы ИФП-1200 (внутренний диаметр разрядной

трубки 7 мм и межэлектродное расстояние 120 мм) при энерговкладе в плазменный канал 860 Дж удалось достичь КПД = 16,9 % в спектральном диапазоне 180…300 нм [26]. При этом столь значительный успех связывают с разрядом в парах кремния [26], образовавшихся при испарении кварцевой оболочки, т. е. с появлением спектральных линий с длинами волн 220, 245, 251, 253 и 288 нм [27].

Поскольку в жестких режимах эксплуатации срок службы импульсной лампы незначителен, то в экспериментах использовали разрядный контур C = 10,1 мкФ и U_C = 1,85…3,1 кВ, который обеспечивал энерговклад в ксеноновую плазму не более 50 Дж. Осциллограммы импульсов тока и напряжения, мощности и энергии в разрядном контуре приведены на рис. 6.

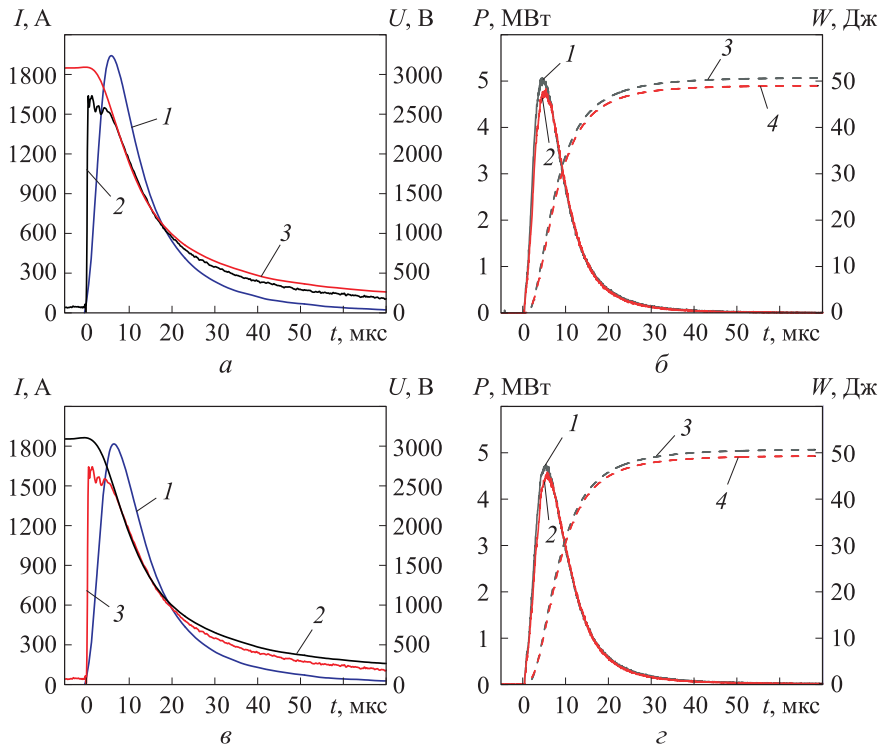


Рис. 6. Осциллограммы (p = 220 (*а*, *б*), 350 торр (*в*, *г*), d = 3 мм):
а, *в* — импульсов тока I (*1*) и напряжений U_C (*2*), U_L (*3*); *б*, *г* — мощности P_C (*1*), P_L (*2*) и энергии W_C (*3*), W_L (*4*) в разрядном контуре

Удельная энергетическая нагрузка W_s на поверхность разрядной трубки в рассматриваемом случае получается более чем на порядок меньше (табл. 2), чем в случае импульсной лампы ИФП-1200, которая составляет по расчетным оценкам примерно W_s = 72 Дж/см^2.

Таблица 2

Электрические параметры и характеристики УФ-излучения исследуемого капиллярного разряда в ксеноне

Параметр	p = 220 мм рт. ст.			p = 350 мм рт. ст.			p = 400 мм рт. ст.		
d, мм	2	3	5	2	3	5	2	3	5
P_s, кВт/см^2	268,4	360,0	289,5	263,0	338,8	311,8	256,7	329,1	305,5
P_v, кВт/см^3	3190	3865	2315	3125	3650	2495	3050	3545	2445
W_s, Дж/см^2	4,6	3,7	2,6	4,3	3,7	2,6	4,6	3,7	2,6
j_m в капилляре, кА/см^2	31,6	27,3	13,1	28,9	25,5	14,1	30,8	24,9	13,7
$\eta_{бак}$, %	26,0	33,5	28,8	24,5	29,6	30,4	24,7	29,3	30,0
$T_я$ капилляра, К	13970	15720	13240	13430	15030	13580	14240	15420	13250

Примечание. P_s, P_v — удельная по площади поверхности и объему пиковая мощность, вложенная в лампу; W_s — удельная по площади поверхности энергия, вложенная в лампу; j_m — амплитуда плотности тока; $\eta_{бак}$ — доля излучения в бактерицидном диапазоне ($\Delta\lambda_{бак}$ = 200…300 нм); $T_я$ — яркостная температура излучения.

В результате анализа приведенных экспериментальных данных (см. рис. 6, табл. 2) сделаны следующие выводы.

1. Разрядный контур выбран достаточно эффективным, так как потери электрической мощности при передаче от накопительного конденсатора к лампе не превышают 4 % (рис. 6, *б*).

2. Увеличение давления в разряде приводит к уменьшению пикового значения импульса тока. В частности, для диаметра плазменного канала 3 мм (рис. 6, *а*) при росте давления от 220 до 350 мм рт. ст. амплитуда силы тока уменьшается на 150 А. Такой эффект связан с увеличением сопротивления плазменного канала.

3. Уменьшение диаметра разрядного промежутка способствует увеличению электрической удельной нагрузки на оболочку. В то же время, как следует из табл. 2, в случае капиллярного канала диаметром 2 мм указанного процесса не наблюдается. Причина этого явления связана с тем, что при работе лампы наблюдается явно выраженный периодический режим затухания импульса тока, что обусловлено существенными потерями энергии в разрядном контуре из-за различия в сопротивлениях лампы и электрической цепи питания.

4. В экспериментах удалось достичь в спектральном диапазоне 200…300 нм яркостной температуры $T_я$ = 15,7 кК, что позволило добиться $\eta_{бак}$ = 26 % общего потока излучения. Ранее в [12] в указанном спектральном диапазоне получена яркостная температура излучения 13,5 кК, при которой выход излучения в бактерицидном диапазоне составил 28,3 %. Сопоставление этих результатов свидетельствует о смещении максимума энергии излучения в сторону более коротких длин волн. Из этого можно заключить, что энерговклад более 3,71 Дж/см^2 для плазменного канала диаметром 3 мм (этот размер является оптимальным) применять не стоит, так как это снизит эффективность источника УФ-излучения в бактерицидной области и, что немаловажно, приведет к уменьшению срока службы.

Выводы подтверждаются выполненными спектральными исследованиями импульсных ламп с различными диаметрами капилляра и давлениями ксенона в разрядном объеме (рис. 7). Скриншоты спектральных распределений излучения при различных конструктивных и электрических характеристиках: давлении ксенона, диаметре разрядного канала, напряжении на накопительном конденсаторе (энергии импульса) приведены на рис. 7.

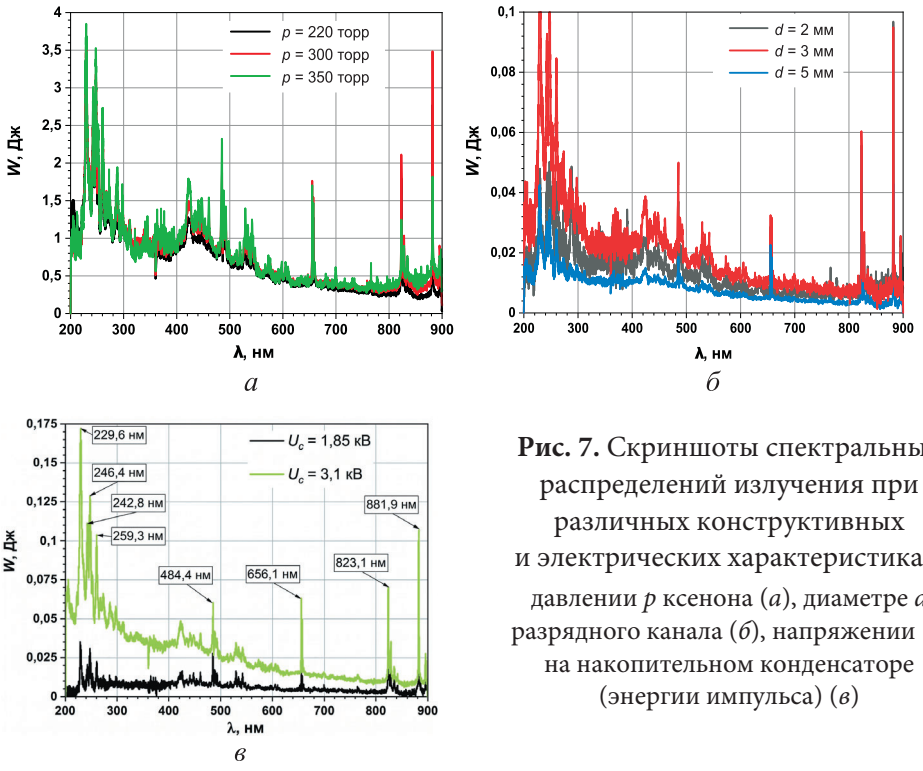


Рис. 7. Скриншоты спектральных распределений излучения при различных конструктивных и электрических характеристиках: давлении p ксенона (*а*), диаметре d разрядного канала (*б*), напряжении U_c на накопительном конденсаторе (энергии импульса) (*в*)

Характер преобразования спектрального распределения излучения ксенонового разряда короткой длительности при изменении конструктивных и электрических параметров импульсных ламп подробно рассмотрены в [3, 14–16, 26, 27]. Применительно к рис. 7 из приведенных в указанных работах заключений можно выделить следующие положения.

1. Спектральное распределение излучения разряда короткой длительности, ограниченного кварцевой оболочкой, характеризуется присутствием в его составе линий кремния [3, 14, 26, 27] и различных атомов, попадающих в плазму из конструкционных материалов лампы (электродов, примесей в наполнении и др.) [1–3]. Вопрос о наличии спектральных линий кремния рассматривался ранее, но, как следует из приведенных данных (рис. 7, *в*), испарения кварцевого стекла не происходит, идентифицированные длины волн принадлежат исключительно излучению ксенонового плазменного канала [3, 14]. Причем, как следует из этого спектра, увеличение энергии разряда (напряжения U_C) приводит к росту интенсивности линий и непрерывного излучения. Указанное явление наблюдается именно в бактерицидном диапазоне 200…300 нм, что является положительным аспектом в реализации цели исследований.

2. С увеличением энергии разряда увеличивается доля коротковолнового излучения, которое не пропускается кварцевой оболочкой, что связано со сдвигом коротковолновой границы пропускания в сторону видимого диапазона [28]. Как следует из рис. 7, *в*, при применяемой удельной электрической нагрузке на оболочку смещения границы прозрачности не происходит.

3. Увеличение давления рабочего газа приводит к смещению максимума спектрального распределения в область вакуумного УФ [14], из рис. 7, *а* следует, что данный процесс не происходит. Существенного изменения в спектрах излучения в исследуемом диапазоне давлений ксенона (220…400 мм рт. ст.) не установлено.

4. Значительное влияние на повышение эффективности излучения в УФ-диапазоне спектра, как это отмечалось ранее, оказывает диаметр плазменного канала. В случае уменьшения диаметра d разрядной трубки от 5 до 3 мм увеличивается энергия излучения на каждой длине волны в УФ-диапазоне более чем в 2 раза (рис. 7, *б*). Данная зависимость объясняется установленной связью между яркостной температурой и диаметром плазменного канала. Аномальное расположение спектра (см. рис. 7, *б*) при диаметре 2 мм ранее связано с энергетическими потерями в разрядном контуре. Зависимость яркостной температуры излучения от диаметра

лампы при фиксированном значении пиковой удельной нагрузки на оболочку приведена на рис. 8.

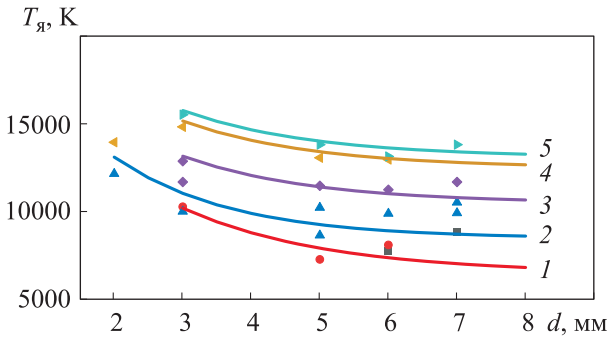


Рис. 8. Зависимость яркостной температуры излучения от диаметра лампы при фиксированных значениях пиковой удельной нагрузки на оболочку:

кривые *1–5* — P_s = 65, 100, 150, 250 и 280 кВт/см^2 соответственно

Как следует из приведенных данных, на яркостную температуру $T_я$ влияет не только диаметр канала, но и мощность, вкладываемая в разряд. В частности, для достижения расчетных значений $T_я$ = 11 600 K, при которой обеспечивается максимальная эффективность ксеноновой плазмы в бактерицидном диапазоне 200…300 нм, необходимо в разрядной трубке диаметром 3 мм получить пиковую удельную нагрузку ~150 кВт/см^2. Полученные результаты исследований конструктивных и электрических параметров импульсной капиллярной лампы при энергии разряда 50 Дж приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследований конструктивных и электрических параметров импульсной капиллярной лампы при энергии разряда 50 Дж

Параметр излучения	Фиксированные конструктивные и электрические параметры капиллярной лампы							
	p = 220 мм рт. ст., d = 3 мм		p = 220 мм рт. ст., U_C = 3,1 кВ			d = 3 мм, U_C = 3,1 кВ		
	Переменные параметры							
	U_C, кВ		d, мм			p, мм рт. ст.		
	1,85	3,1	2	3	5	220	350	400
$W_{200–300}$, Дж	0,89	6,78	2,48	4,78	3,84	6,72	5,07	3,93
$W_{300–900}$, Дж	3,88	13,42	7,02	9,48	9,50	15,77	13,28	10,39
$W_{200–300} / W_{300–900}$, отн. ед.	0,23	0,51	0,35	0,50	0,40	0,43	0,38	0,38

Согласно данным табл. 3, максимальные значения энергии излучения в бактерицидном УФ-диапазоне получены при диаметре разрядного объема 3 мм, заполненного ксеноном при давлении 220 мм рт. ст., и напряжении на накопительном конденсаторе 3,1 кВ. При этом доля излучения $(W_{200–300} / W_{300–900})$ в диапазоне 200…300 нм составляет почти половину энергии излучения в интервале 200…900 нм. Последний результат свидетельствует о перспективности создания ламп данного класса для использования в оптико-электронных УФ-системах различного назначения.

Заключение. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований конструктивных, электрических и спектрально-энергетических характеристик импульсных ламп на основе импульсного капиллярного разряда в ксеноне. Основной целью выполненных работ являлось определение значения диаметра разрядного канала, состава плазмообразующей среды, давления рабочего газа и удельной нагрузки на оболочку, позволяющих достичь максимальной эффективности излучения ксенонового капиллярного разряда в бактерицидном диапазоне 200…300 нм.

Выбор состава наполнения разрядного объема импульсной капиллярной лампы реализован в два этапа. Во-первых, посредством методики, основанной на использовании теплоемкостей химических элементов при постоянном объеме и коэффициентов динамической вязкости компонентов газовой смеси, выполнен расчетный анализ теплопроводности ксенона, криптона, аргона и их смесей. Установлено, что плазмообразующая среда на основе чистого ксенона обеспечивает минимальный тепловой поток на стенку разрядной трубки и, как следствие, обеспечивает увеличенный срок службы. Данный вывод подтвержден испытаниями ламп с указанными наполнениями на ресурс до $5 \cdot 10^5$ импульсов. Во-вторых, реализация математической модели импульсного разряда в инертных газах доказала, что эффективность генерации УФ-излучения ксеноновым разрядом увеличена на 10 % по сравнению с криптоновой лампой, работающей в идентичных режимах электрического питания.

Расчетным путем установлено, что для достижения максимального КПД в указанном диапазоне длин волн необходимо получить значение температуры 11 600 К. В итоге выполненных экспериментальных исследований показано, что указанное значение температуры возможно обеспечить в ксеноновом плазменном канале диаметром 3 мм при энергии разряда 50 Дж. При этом доля излучения в бактерицидной области приближается к 50 % общего энергетического потока в спектральном диапазоне 200…900 нм. Полученные результаты раскрывают широкие воз-

можности для использования импульсных капиллярных ламп на основе разряда в ксеноне в микроэлектронике, медицине, экологии, промышленности и т. д.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Маршак И.С. Импульсные источники света. М., Энергия, 1978.

[2] Гавриш С.В. Источники света на основе разряда в ксеноне. Долгопрудный, Интеллект, 2025.

[3] Басов Ю.Г. Источники накачки микросекундных лазеров. М., Энергоатомиздат, 1990.

[4] Камруков А.С., Козлов Н.П., Шашковский С.Г. и др. Высокоинтенсивные плазменно-оптические технологии для решения актуальных экологических и медико-биологических задач. *Безопасность в техносфере*, 2009, № 3, с. 31–38.
EDN: JGXYMW

[5] Гольдштейн Я.А., Голубцов А.А., Киреев С.Г. и др. Исследование бактерицидной эффективности обеззараживания воздуха и открытых поверхностей импульсным ультрафиолетовым излучением сплошного спектра. *Медицинский алфавит*, 2017, № 18, т. 2, с. 5–8. EDN: ZVMMYZ

[6] Киреев С.Г., Гавриш С.В., Кулебякина А.И. и др. Зависимость эффективности УФ-излучения импульсных ксеноновых ламп от объемной плотности мощности разряда. *Прикладная физика*, 2021, № 6, с. 24–29.
DOI: https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-6-24-29

[7] Киреев С.Г., Кулебякина А.И., Шашковский С.Г. и др. Алгоритм расчета характеристик импульсного газоразрядного источника УФ-излучения для проточных систем биоочистки. *Прикладная физика*, 2019, № 5, с. 71–77. EDN: MYDSJH

[8] Гавриш С.В., Потапенко А.О., Чиликина П.А. и др. Повышение эффективности генерации импульсным ксеноновым разрядом УФ-излучения в спектральном диапазоне 200…300 нм. *Известия вузов. Электроника*, 2026, т. 31, № 1, с. 69–80.
EDN: MMZKMZ

[9] Ванюков М.П., Мак А.А., Садыкова А.И. Предельные яркости канала искрового разряда. *Доклады Академии наук*, 1960, т. 135, № 3, с. 557–559.

[10] Ванюков М.П., Мак А.А. Импульсные источники света высокой яркости. *УФН*, 1958, т. 66, № 10, с. 301–329.
DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.0066.195810f.0301

[11] Маршак И.С. Сильноточные импульсные (искровые) разряды в газах, применяемые в импульсных источниках света. *УФН*, 1962, т. 77, № 2, с. 229–286.
DOI: https://doi.org/10.3367/UFNr.0077.196206b.0229

[12] Чиликина П.А. Исследование электрических и спектрально-энергетических характеристик импульсных ксеноновых ламп с капиллярным разрядом. *Успехи прикладной физики*, 2025, т. 13, № 6, с. 556–563. EDN: EWGAZJ

[13] Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. М., Энергоатомиздат, 1991.

[14] Басов Ю.Г. Спектры коротковолнового излучения импульсных ламп. *ЖПС*, 1984, т. 40, № 6, с. 885–904.

[15] Подгаевский В.М., Скворцов Б.В., Токарева А.Н. Связь условий накачки импульсного ОКГ на гранате YAG:Nd^{3+} с наполнением ламп. *Квантовая электроника*, 1971, № 3, с. 110–112.

[16] Никифоров В.Г. Сравнительные исследования спектральных характеристик излучения импульсных трубчатых ламп с различным наполнением. *ЖПС*, 1971, т. 15, № 1, с. 151–154.

[17] Петренко Н.Ю. Расчет теплопроводности плазмообразующих сред в зависимости от конструктивных параметров разрядных приборов. *Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России*, 2017, № 3, с. 59–64.
EDN: ZCQAVF

[18] Градов В.М., Иванов В.В., Терентьев Ю.И. и др. К теории мощного нестационарного ксенонового разряда с учетом испарения стабилизирующих его разряд стенок. *ТВТ*, 1981, т. 19, № 1, с. 28–35.

[19] Гавриш С.В., Логинов В.В., Пучнина С.В. и др. Исследования температурных полей в разрядных источниках ИК излучения с сапфировой оболочкой. *Оборонный комплекс России — научно-техническому прогрессу*, 2014, № 1, с. 49–55.
EDN: RSUKDV

[20] Рощин Е.В. Влияние наполняющего газа на распыление электродов разрядных ламп. *Светотехника*, 1989, № 1, с. 7–8.

[21] Градов В.М., Гавриш С.В., Рудаков И.В. Моделирование электрофизических процессов в импульсно-периодических трубчатых источниках мощного инфракрасного излучения с сапфировыми оболочками. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение,* 2017, № 6 (117), с. 130–145.
DOI: http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2017-6-130-145

[22] Градов В.М., Желаев И.А., Ломовской И.В. Вычислительный эксперимент в задачах излучающего газа. Метод, алгоритм, программное обеспечение для исследования импульсно-периодических газоразрядных ламп. *Наука и образование: научное издание*, 2012, № 4. EDN: PGRHFT

[23] Градов В.М., Щербаков А.А. Расчет электрофизических характеристик дуговых разрядов в криптоне и ксеноне. *ТВТ*, 1979, т. 17, № 6, с. 1161–1166.

[24] Градов В.М., Щербаков А.А. Расчет излучательных характеристик дуговых криптоновых и ксеноновых разрядов. *Оптика и спектроскопия*, 1979, т. 47, № 4, с. 635–642.

[25] Градов В.М., Гавриш С.В. Математическое меделирование селективно излучающей плазмы в составе сложных оптических систем. *Светотехника*, 1997, № 3, с. 16–18.

[26] Гаврилова Л.И., Дойников А.С., Жигач С.Г. и др. Спектральные характеристики ксеноновых импульсных ламп в жестких режимах в интервале 180…1100 нм. *Светотехника*, 1971, № 5, с. 14–15.

[27] Басов Ю.Г., Болдырев С.А., Токарева А.Н. Излучение импульсного разряда короткой длительности в смесях паров кремния и инертных газов. *ЖПС,* 1976, т. 24, № 3, с. 419–442.

[28] Воробьев А.Н., Даниэль Е.В. К вопросу о температурных изменениях пропускания в видимой и ультрафиолетовой областях спектра при нагреве до 1100 °С. *ЖПС*, 1970, т. 12, № 2, с. 347–349.

Гавриш Сергей Викторович — д-р техн. наук, начальник отдела ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117437, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10, корп. 16).

Чиликина Полина Александровна — младший научный сотрудник ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117437, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10, корп. 16).

Шашковский Сергей Геннадьевич — канд. техн. наук, главный конструктор ООО «НПП «Мелитта» (Российская Федерация, 117437, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 16/10, корп. 16).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гавриш С.В., Чиликина П.А., Шашковский С.Г. Зависимость характеристик УФ-излучения капиллярного разряда от конструктивных параметров импульсной лампы. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2026, № 3 (156), с. 4–27. EDN: ATXBLV

DEPENDENCE OF THE CHARACTERISTICS OF UV RADIATION OF A CAPILLARY DISCHARGE ON THE DESIGN PARAMETERS OF A PULSED LAMP

S.V. Gavrish gsv@melitta-uv.ru
P.A. Chilikina mail@melitta-uv.ru
S.G. Shashkovskiy shasg@melitta-uv.ru

LLC "SPE "Melitta", Moscow, Russian Federation

Abstract

The article investigates the dependence of UV radiation characteristics on the design parameters of pulsed lamps with a quartz envelope based on capillary discharge in inert gases. To address certain environmental, medical, and biological applications, the brightness temperature of the discharge is calculated to ensure maximum radiation efficiency in the germicidal spectral range of 200–300 nm, which amounted to 11,600 K. A theoretical analysis of the

Keywords

Pulsed discharge, capillary, xenon, UV radiation, brightness temperature, germicidal spectral range, discharge circuit

factors determining the radiation energy of the plasma channel in the UV region is being conducted. Various lamp filling compositions are being studied in detail. Based on the calculation of the thermal conductivity of the plasma-forming medium and a mathematical model of the pulsed discharge, the advantage of using xenon as the working gas is demonstrated. The design features and electrical operating conditions of capillary discharge lamps are considered. By varying the capillary diameter, filling pressure, and voltage across the storage capacitor, it was possible to achieve a brightness temperature of 15,700 K for a discharge volume with a diameter of 3 mm at a xenon pressure of 220 Torr. Spectral investigations establish that at a discharge energy of 50 J, radiation generation occurs exclusively in the xenon plasma, no evaporation of the quartz envelope is observed, and the proportion of radiation in the germicidal region approaches 50 % of the total radiative flow in the spectral range of 200–900 nm

Received 18.06.2026
Accepted 17.08.2026
© Author(s), 2026

REFERENCES

[1] Marshak I.S. Impulsnye istochniki sveta [Pulsed light sources]. Moscow, Energiya Publ., 1978.

[2] Gavrish S.V. Istochniki sveta na osnove razryada v ksenone [Light sources based on xenon discharge]. Dolgoprudnyy, Intellekt Publ., 2025.

[3] Basov Yu.G. Istochniki nakachki mikrosekundnykh lazerov [Pumping sources for microsecond lasers]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990.

[4] Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Shashkovskiy S.G., et al. High-level plasma and optical technologies for solving topical ecological and biomedical problems. *Bezopasnost v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2009, no. 3, pp. 31–38 (in Russ.). EDN: JGXYMW

[5] Goldshteyn Ya.A., Golubtsov A.A., Kireev S.G., et al. Research of germicidal efficiency of air and open surfaces disinfection by pulsed ultraviolet light of continuous spectrum. *Meditsinskiy alfavit* [Medical Alphabet], 2017, no. 18, vol. 2, pp. 5–8 (in Russ.). EDN: ZVMMYZ

[6] Kireev S.G., Gavrish S.V., Kulebyakina A.I., et al. Dependence of the Xe flash lamps' UV radiation efficiency on the volumetric power density of the discharge. *Prikladnaya fizika*, 2021, no. 6, pp. 24–29 (in Russ.).
DOI: https://doi.org/10.51368/1996-0948-2021-6-24-29

[7] Kireev S.G., Kulebyakina A.I., Shashkovskiy S.G., et al. Calculation algorithm for the characteristics of a pulsed discharge radiation source for flow-through systems. *Prikladnaya fizika*, 2019, no. 5, pp. 71–77 (in Russ.). EDN: MYDSJH

[8] Gavrish S.V., Potapenko A.O., Chilikina P.A., et al. Increasing the efficiency of UV radiation generation in the spectral range of 200–300 nm by pulsed discharge in xenon. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [Proceedings of Universities. Electronics], 2026, vol. 31, no. 1, pp. 69–80 (in Russ.). EDN: MMZKMZ

[9] Vanyukov M.P., Mak A.A., Sadykova A.I. Limiting brightness of the spark-discharge channel. *Doklady Akademii nauk*, 1960, vol. 135, no. 3, pp. 557–559 (in Russ.).

[10] Vanyukov M.P., Mak A.A. High-intensity pulsed light sources. *Sov. Phys. Usp*., 1958, vol. 1, no. 1, pp. 137–155.
DOI: https://doi.org/10.1070/PU1958v001n01ABEH003090

[11] Marshak I.S. Strong-current pulse (spark) discharges in gas, used in pulsed light sources. *Sov. Phys. Usp*., 1962, vol. 5, no. 3, pp. 478–514.
DOI: https://doi.org/10.1070/PU1962v005n03ABEH003434

[12] Chilikina P.A. Study of electrical properties and radiation characteristics of pulsed xenon lamps with capillary discharge. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2025, vol. 13, no. 6, pp. 556–563 (in Russ.). EDN: EWGAZJ

[13] Rokhlin G.N. Razryadnye istochniki sveta [Discharge light sources]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991.

[14] Basov Yu.G. Spectra of short-wavelength radiation from pulsed lamps. *ZhPS*, 1984, vol. 40, no. 6, pp. 885–904 (in Russ.).

[15] Podgaevskiy V.M., Skvortsov B.V., Tokareva A.N. Influence of the lamp filling on the pumping conditions in a pulsed YAG:Nd^{3+} laser. *Sov. J. Quantum Electron*., 1971, vol. 1, no. 3, pp. 293–295.
DOI: https://doi.org/10.1070/QE1971v001n03ABEH003084

[16] Nikiforov V.G. Comparative study of spectral characteristics of pulsed tubular lamps with different fillings. *ZhPS*, 1971, vol. 15, no. 1, pp. 151–154 (in Russ.).

[17] Petrenko N.Yu. The plasma heat conductivity calculations depending on the constructive parameters discharge devices. *Oboronnyy kompleks — nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii* [Defense Industry Achievements — Russian Scientific and Technical Progress], 2017, no. 3, pp. 59–64 (in Russ.). EDN: ZCQAVF

[18] Gradov V.M., Ivanov V.V., Terentyev Yu.I., et al. Theory of powerful non-steady xenon discharge taking vaporization of its stabilizing walls into account. *High Temp*., 1981, vol. 19, no. 1, pp. 22–28.

[19] Gavrish S.V., Loginov V.V., Puchnina S.V., et al. Study of temperature fields in discharge sources of irradiation with sapphire envelope. *Oboronnyy kompleks — nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii* [Defense Industry Achievements — Russian Scientific and Technical Progress], 2014, no. 1, pp. 49–55 (in Russ.). EDN: RSUKDV

[20] Roshchin E.V. Influence of filling gas on electrode sputtering in discharge lamps. *Svetotekhnika*, 1989, no. 1, pp. 7–8 (in Russ.).

[21] Gradov V.M., Gavrish S.V., Rudakov I.V. Simulation of electrophysical processes in pulse-periodic tubular sources of powerful infrared radiation with sapphire shells.

Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering, 2017, no. 6 (117), pp. 130–145 (in Russ.).
DOI: http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2017-6-130-145

[22] Gradov V.M., Zhelaev I.A., Lomovskoy I.V. Computing experimental in mechanics problem of radiating gas. Method, algorithm and software for research of repetitively pulsed gas-discharge lamps. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2012, no. 4 (in Russ.). EDN: PGRHFT

[23] Gradov V.M., Shcherbakov A.A. Calculation of the electrical and physical characteristics of arcs in krypton and xenon. *High Temp*., 1979, vol. 17, no. 6, pp. 958–963.

[24] Gradov V.M., Shcherbakov A.A. Calculation of radiative characteristics of arc krypton and xenon discharges. *Optika i spektroskopiya*, 1979, vol. 47, no. 4, pp. 635–642 (in Russ.).

[25] Gradov V.M., Gavrish S.V. Mathematical modeling of selective emitting noneqilibrium plasma in complex optical systems. *Light & Engineering*, 1997, vol. 5, no. 3, pp. 16–18.

[26] Gavrilova L.I., Doynikov A.S., Zhigach S.G., et al. Spectral characteristics of xenon flash lamps under severe operating conditions in the 180–1100 nm range. *Svetotekhnika*, 1971, no. 5, pp. 14–15 (in Russ.).

[27] Basov Yu.G., Boldyrev S.A., Tokareva A.N. Radiation of short-duration pulsed discharge in mixtures of silicon vapor and inert gases. *ZhPS*, 1976, vol. 24, no. 3, pp. 419–442 (in Russ.).

[28] Vorobyev A.N., Daniel E.V. Temperature-induced changes in transmission in the visible and ultraviolet spectral regions upon heating up to 1100 °C. *ZhPS*, 1970, vol. 12, no. 2, pp. 347–349 (in Russ.).

Gavrish S.V. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, korp. 16, Moscow, 117437 Russian Federation).

Chilikina P.A. — Junior Researcher, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, korp. 16, Moscow, 117437 Russian Federation).

Shashkovskiy S.G. — Cand. Sc. (Eng.), Chief Designer, LLC “SPE “Melitta” (Miklukho-Maklaya ul. 16/10, korp. 16, Moscow, 117437 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gavrish S.V., Chilikina P.A., Shashkovskiy S.G. Dependence of the characteristics of UV radiation from a capillary discharge on the design parameters of a pulsed lamp. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2026, no. 3 (156), pp. 4–27 (in Russ.). EDN: ATXBLV