

Пространственное распределение излучения импульсных ксеноновых ламп с различной конфигурацией плазменного канала

С. В. Гавриш, Д. Н. Кугушев, Д. Ю. Пугачев, Р. М. Ушаков

Приведены результаты экспериментальных исследований пространственного распределения излучения импульсных ксеноновых ламп с прямой и U-образной конфигурацией плазменного канала в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне. Показана зависимость формы индикатрисы от конструктивных особенностей импульсной лампы, коэффициентов поглощения плазмы и оболочки, ограничивающей разряд.

Ключевые слова: пространственное распределение излучения, индикатриса, импульсная ксеноновая лампа, коэффициент поглощения, плазменный, канал спектральный диапазон.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-37-44

Импульсные ксеноновые газоразрядные лампы широко применяются в биоцидных технологиях обеззараживания воздуха и поверхностей в помещении [1, 2]. При этом установлено, что чем выше удельная электрическая мощность разряда, тем больше КПД излучения в УФ-области спектра. В то же время с повышением электрической нагрузки на разрядную трубку наблюдается несколько негативных процессов в импульсной газоразрядной лампе, приводящих к снижению ее долговечности и надежности [3]. Например, происходит испарение оксида кремния из материала оболочки, способствующее изменению состава плазмы и, как следствие, увеличению поглощения излучения в УФ-области спектра, кристаллизации кварцевого стекла, снижающей механическую прочность разрядной трубки, и т. д. [3].

Для реализации возникшей проблемы применяется техническое решение, основанное на увеличении длины плазменного канала (величины разрядного объема) с одновременным приданием U-образной конфигурации разрядной оболочке для сохранения компактности импульсной газоразрядной лампы [4]. Согласно работам [1, 2], эффективность обеззараживания во многом зависит от равномерности облученности окружающих поверхностей, поэтому изучение влияния конфигурации плазменного столба на распределение в пространстве УФ-излучения (индикатрисы) является актуальной задачей, решение которой и является целью представленной работы.

Теоретический анализ факторов, определяющих пространственное распределение излучения газоразрядной лампы

Изучению индикатрис импульсных ксеноновых ламп посвящено ограниченное количество публикаций [3, 5, 6]. При этом в большинстве указанных работ исследования проводились в видимом диапазоне спектра, что обусловлено основным применением импульсного ксенонового разряда в качестве источника накачки активных сред лазеров на основе АИГ: Nd⁺³ с полосой поглощения в диапазоне длин волн 500–900 нм [7]. Исключо-

Гавриш Сергей Викторович¹, нач. отдела, д.т.н.
E-mail: svgavr@list.ru

Кугушев Дмитрий Николаевич¹, зам. нач. лаб.

Пугачев Дмитрий Юрьевич¹, зам. нач. цеха.

Ушаков Роман Максимович², студент.

¹ ООО «НПП «Мелитта».

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

² МГТУ им. Н. Э. Баумана

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 10 марта 2021 г.

© Гавриш С. В., Кугушев Д. Н., Пугачев Д. Ю.,
Ушаков Р. М., 2021

чением является работа [5], в которой подробно рассматриваются характеристики излучения дуговых трубчатых ксеноновых ламп переменного тока в спектральном диапазоне 185–4500 нм, предназначенных для промышленного освещения. В связи с появлением новых сфер применения газового разряда (УФ обеззараживание, ИК-помехи и т. д.) возникла необходимость исследований индикатрис в УФ- и ИК-области оптического спектра. Поэтому вначале рассмотрим некоторые особенности импульсного ксенонового разряда с позиций влияния на пространственное распределение излучения газоразрядной лампы, а затем проанализируем полученные нами индикатрисы импульсных ксеноновых ламп прямой и U-образной конфигураций.

Во-первых, форма индикатрисы определяется конструкцией лампы. При выходе излучения из плазмы равномерному распределению его в пространстве препятствуют электроды газоразрядной лампы, которые частично затеняют и, соответственно, поглощают некоторую долю энергетического потока. Одновременно различная конфигурация плазменного канала (прямая, спиральная, U-образная) вносит изменения в форму индикатрисы за счет сложного конструктивного исполнения и воздействия собственного излучения на близко расположенные соседние участки разряда.

Во-вторых, импульсный режим работы лампы предполагает наличие в плазме таких явлений как контракция разрядного канала по оси или вдоль стенки, конвекция при различных пространственных положениях, что создает неравномерность распределения яркости источника излучения.

В-третьих, ксеноновая плазма в импульсных лампах ограничена кварцевой оболочкой, которая влияет на пространственное распределение путем частичного поглощения стенкой радиационного потока, френелевского отражения излучения от внутренней и внешней поверхностей разрядной трубки. Отражение излучения обратно в плазму приводит к частичной поляризации выходящего излучения [3].

В-четвертых, значительное влияние на пространственное распределение потока излучения газоразрядной лампы оказывает коэффициент поглощения плазмообразующей сре-

ды k_λ . В случае импульсной ксеноновой плазмы k_ν сложным образом зависит от длины волны и удельной электрической мощности разряда. По этой причине подробнее рассмотрим результаты расчетных исследований коэффициента поглощения импульсной ксеноновой плазмы.

Расчетные исследования коэффициента поглощения ксеноновой плазмы и анализ данных других авторов выполнен при нашем участии в некоторых работах [8–11]. При вычислениях коэффициента поглощения XeI рассматривались первые члены спектральных серий, нами было учтено более 75 линий в спектральных диапазонах 120–200, 350–1500 нм, в том числе четыре резонансных линии. В приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) при расчете k_ν учитывались фотоионизация атомов и ионов, торможение электронов в полях нейтралов и ионов, дискретные переходы связанных электронов. Полученные при нашем участии расчетные данные по коэффициенту поглощения плазмы ксенона с требуемой степенью детализации хранятся в созданной базе данных и используются при моделировании процессов в импульсных ксеноновых разрядах. Расчеты показали следующие результаты:

1. В случае ЛТР суммарный коэффициент поглощения зависит от длины волны излучения, температуры и давления.

- Для температур выше 7×10^3 К ширина линий, в основном, определяется ударным уширением электронами нейтральных и возбужденных атомов. С увеличением температуры коэффициент поглощения резко возрастает, например, при изменении температуры на 25 % (с 8000 по 10 000 К) значения k_ν возрастают на отдельных участках спектра почти на два порядка. При этом меняются как его непрерывный, так и оптически более плотный линейчатый компоненты [9].

- Увеличение давления ксенона в 3 раза (с 0,5 до 1,5 МПа) увеличивает коэффициент поглощения в среднем 1,5–2 раза [10].

- В ультрафиолетовой области спектра коэффициент поглощения определяется резонансными линиями (в центре которых величина k_ν достигает примерно 10^5 см^{-1}) и фотоионизацией с основного энергетического уровня. Крылья резонансных линий вносят

значительный вклад в коэффициент поглощения, полностью его определяя на участке 110–300 нм. Поэтому учет линий в УФ-области спектра оказывается существенным при оценке энергетических потерь на разогретой кварцевой стенке [8].

- Спектральные линии, образованные переходами на $6s$ и $6p$ уровни, расположены весьма часто в областях 350–500 и 700–1500 нм. Перекрытие этих уширенных линий приводит к тому, что коэффициент поглощения в этих спектральных интервалах превышает непрерывный фон в 2–5 раз, что особенно заметно в ближней инфракрасной области 750–1000 нм [8].

2. Согласно монографии [3], в жестких энергетических режимах эксплуатации наблюдается испарение граничащей с ксеноновой плазмой поверхности кварца, что способствует введению в состав плазмообразующей среды паров кремния. Влияние продуктов эрозии кварцевой оболочки на коэффициент поглощения ксеноновой плазмы различен. При низких температурах, соответствующих режимам с большой длительностью импульса (более 10^{-3} с) продукты испарения кварца увеличивают почти вдвое коэффициент поглощения в спектральных областях 1500–3000, 350–750 нм, в 5 раз в области 200–250 нм, в 10 раз на участке 150–200 нм. Возрастание k_ν в УФ-области приводит к росту лучистого потока в этой спектральной области и, как следствие, увеличению потерь на стенках [11].

Из всего сказанного следует, что газоразрядная лампа с определенной конфигурацией плазменного канала при работе в разрядном контуре будет иметь свое фиксированное пространственное распределение излучения, характерное для применяемого электрического режима работы, состава, давления и коэффициента поглощения плазмообразующей среды, требуемого спектрального интервала длин волн.

Методика измерений

При разработке методики исследований важно отметить временной аспект формирования плазменного канала при прохождении импульса тока. Индикатриса излучения импульсных ламп определяется формой и продольным и радиальным распределением ярко-

сти светящего разрядного столба. В импульсных лампах распределение яркости плазмы непрерывно меняется в течение прохождения импульса тока и стабилизируется при достижении квазистационарной стадии разряда [3]. По этим причинам непрерывно меняется и пространственное распределение излучения. Однако эти изменения незначительны, следовательно, для практических целей можно рассматривать пространственное распределение интегральных фотометрических параметров в различных спектральных интервалах, где показатель поглощения плазмы примерно одинаков при достижении разрядом квазистационарного состояния.

В наших исследованиях измерение индикатрисы в относительных единицах проводилось посредством горизонтального поворотного стола с шагом 10° (рис. 1). При всех измерениях горизонтальная ось фотоприемников 2 и 3 (для большей информативности методики на рисунке приемники показаны с небольшим смещением) пересекала центр разрядного промежутка исследуемых ламп 1. Сигнал с приемных устройств регистрировался осциллографом Tektronix TDS 2024B.

Расчетная точка на индикатрисе получалась путем усреднения не менее трех измерений пиковой силы ИК-излучения или энергетической экспозиции в УФ-диапазоне. В наших исследованиях были задействованы следующие приемники излучения.

- Для УФ-диапазона – фотоэлектрический приемник излучения на основе фотодиода SGIux SG01D-C18 со спектральной чувствительностью в диапазоне 0,24–0,28 мкм с максимумом на длине волны 0,25 мкм.

- Для среднего ИК-диапазона – охлаждаемый фоторезистор типа ФСГ со спектральным диапазоном чувствительности 2,0–5,0 мкм с максимумом на 4,3 мкм.

В качестве с исследуемых источников излучения нами использовались экспериментальные образцы импульсных ксеноновых ламп:

- с прямым плазменным каналом диаметром 5 мм и длиной 120 мм. Данный газоразрядный источник излучения работал при удельной электрической нагрузке $P_{уд}$ на оболочку не более 11 Вт/см^2 с энергией импульса не более 60 Дж. Подробно конструктивные характеристики и режимы работы данной лампы рассмотрены в работах [2, 4];

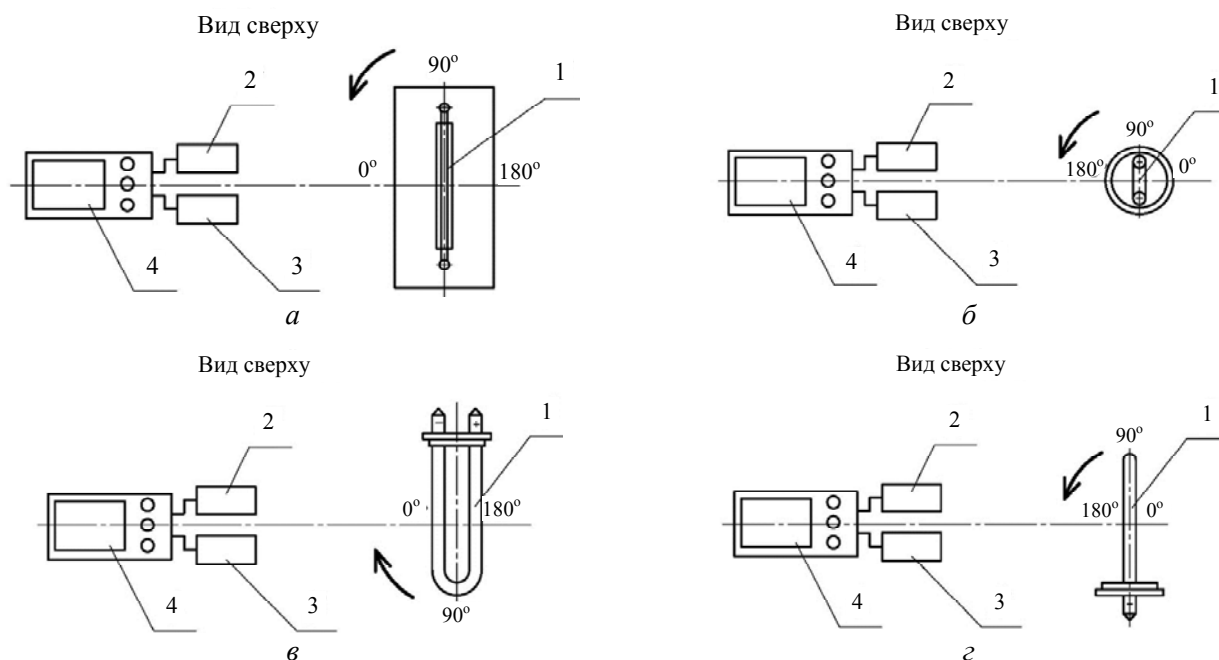


Рис. 1. Блок-схемы экспериментальных исследований индикатрис излучения импульсных ксеноновых ламп с прямой (а) и U-образной (б–г) конфигурацией плазменного канала. 1 – исследуемая лампа; 2, 3 – фотоприемные устройства; 4 – осциллограф.

• с U-образной конфигурацией разрядной дуги. Исследуемая газоразрядная лампа имела диаметр разрядного промежутка 7 мм и межэлектродное расстояние 300 мм. Энергия импульса при испытаниях составляла 200 Дж при $P_{уд} = 16 \text{ Вт/см}^2$. Особенности конструкции и условий эксплуатации приведены в работах [4].

Другие методологические особенности исследований нами будут рассмотрены в ходе дальнейшего изложения и обсуждения полученных результатов.

Экспериментальная часть

Исследование импульсной ксеноновой лампы с прямым плазменным каналом

Как уже отмечалось, индикатрисы освещивания (т. е. в видимом диапазоне) прямых трубчатых импульсных ламп довольно подробно изучались в ряде научных работ, результаты которых обобщены в монографии [3]. Важно отметить, что на момент проведения указанных исследований основное применение импульсные ксеноновые лампы нашли в качестве источников накачки лазеров. По этой причине режим работы таких ламп был достаточно «мягким»: величина емкости разрядного конденсатора колебалась от 200 до 1800 мкФ, напряжение к лампе прикладывалось от 500

до 2000 В. При этом во всех разрядных контурах присутствовала индуктивная нагрузка до 100 мкГн, посредством которой регулировались передний и задний фронты импульса тока. В итоге длительность импульса тока по уровню 0,35 достигала 500 мкс, что снижало вероятность испарения оболочки и ослабляло воздействие ударных волн.

На рис. 2 представлена полученная нами индикатриса излучения в УФ- и ИК-областях спектра прямой трубчатой лампы в режимах, описанных в работе [2, 4].

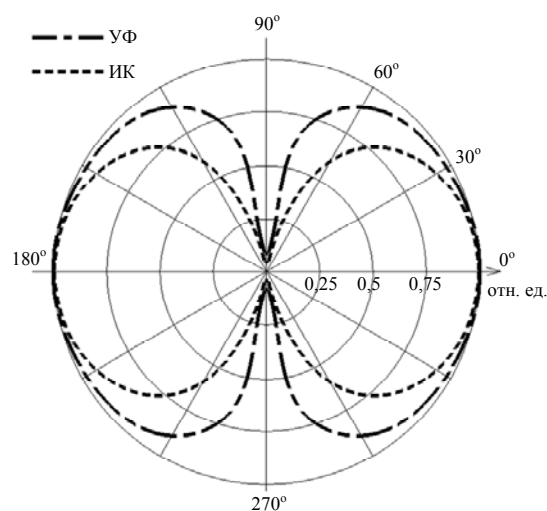


Рис. 2. Пространственное распределение излучения импульсной ксеноновой лампы с прямым плазменным каналом.

Из приведенных данных следует, что индикатриса для инфракрасной области, где k_ν выше, проходит внутри индикатрисы в ультрафиолетовом диапазоне, где плазма поглощает слабее. Полученный нами результат подтверждает сделанное в теоретическом разделе предположение о преобладающей роли коэффициента поглощения плазмы при пространственном распространении излучения импульсной лампы.

Полезной для практических целей величиной, связанной с пространственным распределением излучения, является эквивалентный телесный угол – отношение полного энергетического потока лампы к энергии излучения в принятом за основное направление излучения. Для прямых трубчатых ламп таким направлением является нормаль к оси лампы.

В наших исследованиях эквивалентные телесные углы рассчитывались по индикатрисам методом зональных телесных углов [12] с шагом 10° . В случае прямой трубчатой лампы, т. е. симметричного источника, эквивалентный телесный угол определяется следующей формулой:

$$\Omega = 2\pi \int_0^\pi f(\theta) \sin \theta \times d\theta$$

или $\Omega = 4\pi \sin \Delta\theta \sum_{\Delta\theta}^{\pi-\Delta\theta} f(\theta) \sin \theta,$

где $f(\theta)$ – текущее значение индикатрисы для угла θ в относительных единицах.

Расчет эквивалентного угла Ω по приведенным на рис. 2 индикатрисам дал следующие результаты:

– спектральный диапазон 0,24–0,28 мкм – 11,75 ср.;

– спектральный диапазон 2,0–5,0 мкм – 10,37 ср.

Расчетные данные по величине Ω являются актуальными при расчете энергетического баланса выходящего из ксеноновой плазмы потока излучения, а приведенная на рис. 2 индикатриса позволяет произвести вычисления не только энергетической облученности поверхностей, но спроектировать другие осветительные системы кругового и направленного действия.

Исследование импульсной ксеноновой лампы с U-образной конфигурацией разрядной дуги

Сложность исследования данной конструкции импульсной ксеноновой лампы связана с наличием специального цоколя, закрепляющим токовводы в строго фиксированном положении и обеспечивающим присоединение к установке. Несмотря на то, что конструктивное исполнение лампы позволяет провести испытание при углах поворота до 300° , мы ограничились диапазоном $0-180^\circ$, исходя из предположения, что в неисследованных направлениях пространственное распределение излучения будет близко к индикатрисе, показанной на рис. 2, в интервале углов $60^\circ-90^\circ$.

Вторая трудность наших исследований заключалась в том, что пространственных положений двух параллельных частей плазменного канала U-образной конфигурации по отношению к направлению на приемное окно фотоприемника может быть неограниченное количество. По этой причине в своих исследованиях мы выбрали три основных исходных положения импульсной лампы (рис. 1), которые частично перекрывают весь диапазон возможных вариаций поворотов плазменного столба.

На рис. 3 приведены полученные нами результаты.

Из представленных на рис. 3 данных можно сделать следующие заключения.

1. Измерения при повороте газоразрядной лампы U-образной конфигурации вокруг своей оси (рис. 1, б) подтверждают данные монографии [3] о практически равномерном распределении излучения плазменного канала в пространстве. Наблюдаемые провалы с минимумом при 90° и 270° (рис. 3, а) обусловлены совмещением двух частей плазменного канала в направлении визирования фотоприемного устройства. По этой же причине вокруг точки А индикатрисы наблюдается преобладание интенсивности ИК-излучения в сравнении УФ энергетическим потоком. Указанная зона индикатрисы характеризуется таким положением импульсной лампы, когда в направлении визирования фотоприемника попадает полный радиационный поток от одной части плазменного канала и ИК-излучение от нагретой стенки другой части.

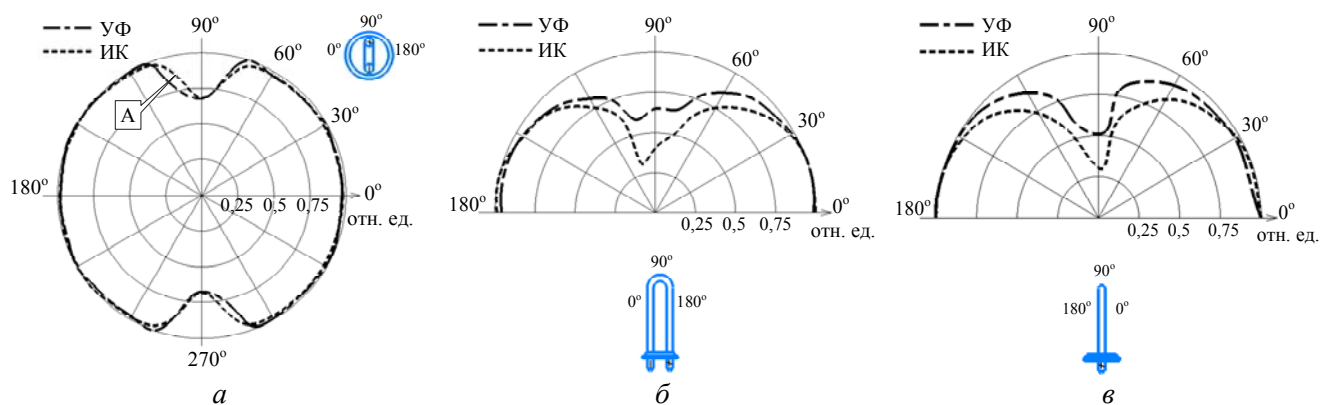


Рис. 3. Индикатрисы излучения в различных плоскостях согласно рис. 1, б–г.

2. Индикатрисы на рис. 3, б и в схожи между собой. Отличие состоит в интенсивности излучения, достигающего приемного окна фотоприемников. В случае положения импульсной лампы, показанного на рис. 1, з, интенсивности излучения в обоих исследуемых спектральных диапазонах превышают примерно в полтора раза данные, полученные при измерениях по схеме рис. 1, в. Учитывая тот факт, что измерения проводились на расстоянии более 2,5 м, то по правилам фотометрии, исследуемую лампу можно рассматривать как точечный источник. Поэтому полученный результат объясняется суперпозицией энергетических потоков от двух частей плазменного канала (рис. 1, з), достигающих входного окна приемника излучения. Наблюдаемые провалы в ходе кривых индикатрис (рис. 3, б и в) в диапазоне 60° – 150° обусловлены малой протяженностью излучающей поверхности третьей части плазменного канала, соединяющей два параллельных отрезка разряда [4]. Неравномерность излучения в указанных направлениях связана с технологическими сложностями при изготовлении третьей зоны, и как следствие, усилением эффектов преломления и френелевского отражения кварцевой оболочкой потока излучения.

Заключение

В статье приведены результаты исследований пространственного распределения излучения импульсных ксеноновых ламп с прямой и U-образной конфигурацией плазменного канала в ультрафиолетовом и ближ-

нем инфракрасном спектральном диапазоне. На основе теоретического анализа и результатов экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- факторами, определяющими распределение излучения импульсной газоразрядной лампы в пространстве, являются ее конструктивное исполнение и коэффициент поглощения плазмы, который, в свою очередь, зависит от режимов эксплуатации и состава плазмообразующей среды;
- импульсная газоразрядная лампа имеет бесконечное число индикатрис излучения, которые определяются временем измерения в ходе прохождения импульса тока (достижения квазистационарного состояния плазмы) и спектральным диапазоном, в котором проводятся исследования.

Представленные результаты наших исследований являются основой для проведения расчета различных облучательных систем, в которых применяются импульсные газоразрядные лампы рассматриваемого типа. В частности, для установок обеззараживания полученные данные позволяют определить эффективное время воздействия УФ-излучения на поверхность по энергетической экспозиции площадки, расположенной в направлении минимального значения на индикатрисе излучения импульсной лампы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольдштейн Я. А., Голубцов А. А., Киреев С. Г., Шапковский С. Г. // Медицинский альманах. 2019. № 3–4. С. 95.

2. Киреев С. Г., Кулебякина А. И., Шашковский С. Г., Тумашевич К. А. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 71.

3. Маршак И. С., Дойников А. С., Жильцов В. П. и др. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978.

4. Гольдштейн Я. А., Шашковский С. Г. Патент РФ № 2396092. Установка для обеззараживания воздуха / МПК А61L 9/20. Оpubл. 10.08.2010. Бюл. 22.

5. Дойников А. С., Еремин Е. А., Калинин Ю. А., Пахомов В. К. Пространственное распределение энергии излучения и КПД трубчатых импульсных ламп. / Сборник статей «Импульсная фотометрия». – Л.: Машиностроение, 1972. Вып. 2. С. 126–130.

6. Гаврилова Л. И., Дойников А. С., Пахомов В. К. Обобщение характеристик излучения трубчатых импульсных ксеноновых ламп / Сборник статей «Импульсная фотометрия». – Л.: Машиностроение, 1973. Вып. 3. С. 103–113.

7. Либерман И. Источники некогерентного оптического излучения / Справочник по лазерам (под ред. А. М. Прохорова). – М.: Сов. радио, 1978. С. 58–78.

8. Градов В. М., Гавриш С. В., Пугачев Д. Ю. и др. // Прикладная физика. 2019. № 6. С. 18.

9. Градов В. М., Гавриш С. В., Желает И. А., Сурдо А. В. Радиационные характеристики многокомпонентной плазмы щелочных металлов, ртути и инертных газов / Тез. докл. XLII Международ. конф. по физике плазмы и УТС. – Звенигород, 2015. С. 275.

10. Градов В. М., Желает И. А., Коробков С. С. и др. // Математика и математическое моделирование. 2017. № 6. С. 54.

11. Градов В. М., Терентьев Ю. И., Щербаков А. А. // Известия СО АН СССР. Сер. техн. наук. 1982. Т. 3. № 1. С. 86.

12. Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия. – М.: Энергия, 1977.

PACS: 07.50-e

Spatial distribution of radiation from pulsed xenon gas-discharge lamps with different configurations of the plasma channel

S. V. Gavrish¹, D. N. Kugushev¹, D. Y. Pugachev¹, and R. M. Ushakov²

¹ Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd.
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia
E-mail: svgavr@list.ru

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
5/1 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia

Received March 10, 2021

The paper presents the results of studies of the spatial distribution of radiation from pulsed xenon lamps with a straight and U-shaped plasma channel configuration in the ultraviolet and near infrared spectral range. The dependence of the shape of the indicatrix on the design features of the flash lamp, the absorption coefficients of the plasma and the envelope limiting the discharge is shown.

Keywords: spatial distribution of radiation, indicatrix, pulsed xenon lamp, absorption coefficient, plasma channel, spectral range.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-2-37-44

REFERENCES

1. Ya. A. Goldshtein, A. A. Golubtsov, S. G. Kireev, and S. G. Shashkovskiy, J. Medical almanac, No. 3–4, 95 (2019).
2. S. G. Kireev, A. I. Kulebyakina, S. G. Shashkovskiy, and K. A. Tumashevich, Applied Physics, No. 5, 71 (2019) [in Russian].
3. I. S. Marshak, A. S. Doinikov, V. P. Zhiltsov, et. al., *Pulse light sources* (Energy, Moscow, 1978) [in Russian].

4. Ya. A. Goldstein and S. G. Shashkovsky, RF patent No. 2396092. Installation for air disinfection / IPC A61L 9/20 / 10.08.2010. – Bull. 22.
5. A. S. Doinikov, E. A. Eremin, Yu. A. Kalinin, and V. K. Pakhomov, *Spatial distribution of radiation energy and efficiency of tubular flash lamps*, in *Pulse Photometry* (Mechanical engineering, Leningrad, 1972). Iss. 2. P. 126–130 [in Russian].
6. L. I. Gavrilova, A. S. Doinikov, and V. K. Pakhomov, *Generalization of the radiation characteristics of tubular pulsed xenon lamps*, in *Pulse Photometry* (Mechanical Engineering, Leningrad, 1973). Iss. 3. P. 103–113 [in Russian].
7. I. Lieberman, *Sources of incoherent optical radiation*, in *Handbook of Lasers* (Sov. Radio, Moscow, 1978). P. 58–78 [in Russian].
8. V. M. Gradov, S. V. Gavrish, S. S. Korobkov, and D. Yu. Pugachev, *Applied Physics*, No. 6, 18 (2019) [in Russian].
9. V. M. Gradov, S. V. Gavrish, I. A. Zhelayev, and A. V. Surdo, *Radiation characteristics of multicomponent plasma of alkali metals, mercury and inert gases*, in *Abstracts. Reports XLII International. Conf. on Plasma Physics and Controlled Fusion*. (Zvenigorod, 2015), p. 275 [in Russian].
10. V. M. Gradov, I. A. Zhelaev, S. S. Korobkov, et al., *Mathematics and Mathematical Modeling*, No. 6, 54 (2017).
11. V. M. Gradov, Yu. I. Terent'ev, and A. A. Shcherbakov, *Izvestiya SO AN SSSR. Ser. tech. sciences* **3** (1), 86 (1982).
12. R. A. Sapozhnikov, *Theoretical photometry* (Energy, Moscow, 1977) [in Russian].