

Зависимость эффективности УФ-излучения импульсных ксеноновых ламп от объемной плотности мощности разряда

С. Г. Киреев, С. В. Гавриш, А. И. Кулебякина, С. Г. Шашковский

Представлены результаты исследования влияния пиковой и средней электрической объемной плотности мощности на эффективность излучения и яркостную температуру в бактерицидном диапазоне спектра 200–300 нм. Получена линейная зависимость изменения КПД излучения в диапазоне от 5,1 до 8,4 % при росте средней объемной плотности мощности от 177 до 390 кВт/см³. Зависимость яркостной температуры в указанной области спектра от пиковой объемной плотности мощности представляет собой логарифмический характер с уменьшением скорости роста при приближении к 9 кК. Такой эффект может быть связан как с запирающим излучением парами испаренного кварца, так и с экранированием УФ-излучения внешними слоями плазмы.

Ключевые слова: импульсная лампа, кварц, излучение, КПД, эффективность, яркостная температура, объемная плотность мощности.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-24-29

Введение

Импульсная плазменно-оптическая технология обеззараживания воздуха и поверхностей, активно развиваемая как в России [1], так и в США [2], основана на использовании высокоинтенсивного излучения сплошного спектра в бактерицидном диапазоне длин волн (200–300 нм). КПД преобразования электрической мощности разряда в энергию излучения в указанном спектральном интервале определяет бактерицидную эффективность всей оптико-электронной системы обеззараживания в целом. Известно [3], что изменение удельной электрической мощности разряда

приводит к трансформации температурного поля в плазме и, как следствие, к изменению яркостной температуры и КПД генерации излучения в различных спектральных интервалах оптического диапазона. Целью данной работы является определение зависимости между удельной мощностью разряда и эффективностью генерации УФ-излучения.

Теоретический аспект изучаемого вопроса

С момента зажигания разряда в ходе формирования плазменного канала вплоть до достижения его квазистационарного состояния происходит трансформация спектрального распределения излучения газового разряда. Данное явление связано с форсированной ионизацией межэлектродного пространства газоразрядной лампы, ростом температуры и потерь энергии на излучение, теплопроводностью, амбиполярной диффузией и т. д. Квазистационарная стадия разряда характеризуется уравниванием электрической мощности разряда и энергетических потерь плазмы, что позволяет предположить зависимость эффективности УФ-излучения от удельной мощности.

Киреев Сергей Геннадьевич, нач. лаб.

E-mail: kireevsg.melitta@gmail.com

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

E-mail: svgavr@list.ru

Кулебякина Анна Игоревна, зав. сектором.

Шашковский Сергей Геннадьевич, гл. конструктор, к.т.н.

ООО «НПП «Мелитта».

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

Статья поступила в редакцию 28 октября 2021 г.

© Киреев С. Г., Гавриш С. В., Кулебякина А. И., Шашковский С. Г., 2021

Вопросам исследования КПД излучения импульсного ксенонового разряда в УФ-области посвящено ограниченное количество работ, после научного анализа которых следует выделить следующие результаты:

1. Импульсные ксеноновые трубчатые лампы обладают сопротивлением разряда порядка 1 Ом в момент максимума электрической мощности и аperiodическим или близким к нему по форме током. Эффективность энерговыклада в плазму в таких лампах составляет 80–90 % [3]. КПД излучения, рассчитанный по запасенной в конденсаторе энергии, в бактерицидном диапазоне 200–300 нм может достигать величины 10 % [4], а интенсивность излучения в зависимости от параметров разрядного контура изменяется в диапазоне 1–10 кВт/см².

2. В зависимости КПД излучения от энергии разряда [5], наблюдается выраженный максимум, который, вероятно, объясняется эффектом обратимой непрозрачности кварцевого стекла, возникающим при нагреве слоя оболочки толщиной 0,1 мм, контактирующего с плазмой, до температуры более 3000 К, его испарении и интенсивном поглощении в УФ-области спектра [6].

3. Авторы публикации [7] предлагают определять характер относительного спектрального распределения, а, следовательно, и КПД излучения, как параметр, зависящий от средней удельной мощности за время разряда:

$$p = \frac{4W}{\pi d^2 l \tau} \quad (1)$$

где W – энергия разряда; d , l – диаметр и длина плазменного канала, соответственно; τ – длительность разряда. Однако отсутствие сведений о влиянии аperiodичности контура, который за счет разного декремента затухания может привести к одинаковым значениям средней удельной мощности при совершенно разных осциллограммах мгновенной удельной мощности, не позволяет рассматривать приведенную формулу, в качестве однозначно определяющей излучательный КПД лампы.

4. В работе [8] для ламп с внутренним диаметром 5–29,5 мм длительностью разряда более 300 мкс показан практически постоянный КПД излучения в спектральном диапазоне 280–420 нм при изменении средней удельной электрической мощности в диапазоне от 0,1 до 2,4 МВт/см³.

5. В работе [4] автором для разрядов длительностью около 3 мкс предложено анализировать влияние удельной объемной электрической мощности в лампе на эффективность излучения в различных спектральных диапазонах. На примере ламп с внутренними диаметрами колб 3, 5, 7 и 16 мм показаны зависимости КПД от $P_{уд}$ в спектральных диапазонах 185–400 нм.

Таким образом, проведенный анализ показывает отсутствие однозначно трактуемой зависимости эффективности излучения в УФ-области спектра от удельной объемной мощности. Кроме того, очевиден недостаток исследований для импульсных разрядов длительностью, лежащей в диапазоне от 3 до 300 мкс.

Целью данной работы является изучение влияния пиковой и средней электрической объемной плотности мощности на эффективность излучения импульсной ксеноновой лампы в спектральном диапазоне 200–300 нм при длительностях разряда в диапазоне 50–150 мкс.

Методика эксперимента

Объектом исследований являлись газоразрядные лампы с внутренним диаметром разрядной трубки 5 мм и межэлектродным расстоянием 120 мм. Давление заполняющего разрядный объем ксенона в холодном состоянии составляло 220 Торр. В качестве материала оболочки лампы использовался кварц марки IImasil PN с коэффициентом пропускания 80–90 %, начиная с длины волны 215 нм [9]. Фиксация и герметизация токовводов осуществлялась обжатием кварцевым стеклом тонкой молибденовой фольги.

Исследование излучательных характеристик осуществлялось за счет сочетания фотодиодного приемника излучения, разработанного на основе фотодиода SG01D-C18 с временем нарастания сигнала, не превышающим 15 нс, и оптоволоконного спектрометра AvaSpec-ULS2048-USB. Измерение электрических характеристик разряда и контура проводилось с помощью малоиндуктивных делителей напряжения смешанного типа Pintek HVP-39Pro с временем нарастания сигнала, не превышающим 2 нс, а также безындуктивного токового шунта SDN-001 с минимальным временем нарастания 30 нс и сопротивлением 1,012 мОм. Методика измерений и вычислений энергетических характеристик подробно

описана в [10]. Яркостная температура $T_{я}$ импульсного разряда расчетным путем определялась по осциллограммам, регистрируемых приемником излучения на основе фотодиода SG01S-C18 с эффективным диапазоном спектральной чувствительности 237–267 нм. При расчетном анализе полученных результатов предполагалось, что разрядная трубка по диаметру полностью заполнена ксеноновой плазмой. Математическая обработка осциллографических и спектральных экспериментальных данных, а также получение аппроксимационных зависимостей проводились в программе Origin Pro.

В ходе выполнения экспериментов изменение объемной плотности мощности разряда осуществлялось путем варьирования па-

раметров разрядного контура, основные характеристики которого приведены в табл. 1.

За исключением индуктивности и сопротивления контура, которые менялись одновременно за счет смены импульсного трансформатора зажигания или конденсатора, за один раз варьировался только один параметр разрядного контура.

Для обеспечения точности измерений после проведения каждого эксперимента в режимах, соответствующих табл. 1, у исследуемой импульсной лампы проверялись электрические параметры и характеристики УФ-излучения, при ее работе в режиме 1. В случае отклонения зарегистрированной энергии излучения более чем на 10 % исследуемая лампа заменялась на другой экспериментальный образец.

Таблица 1

Основные параметры исследуемых разрядных контуров

Режим	1	2	3	4	5	6	7
C_0 , мкФ	61	58	29	121	61	61	61
U_0 , кВ	1,37	1,43	1,45	1,38	1,2	1,07	1,44
W_0 , Дж	57	59	30,5	115	44	35	63
L_k , мкГн	53	15	17	7	7	7	7
R_k , мОм	138	56	63	22	22	22	22

Примечание. В таблице введены следующие обозначения: C_0 , U_0 – емкость и напряжение разрядного конденсатора, соответственно; W_0 – запасенная в конденсаторе энергия; L_k , R_k – индуктивность и сопротивление контура соответственно.

Результаты исследований

Выполненный цикл исследований позволяет оценить и сопоставить между собой энергетические и спектральные характеристики УФ-излучения импульсной ксеноновой лампы при работе в различных электрических режимах испытаний.

Полученные результаты измерения электрических и излучательных параметров, а также расчетные параметры энерговыклада и эффективности УФ-излучения ксеноновой плазмы сведены в табл. 2 и продемонстрированы на рис. 1–3.

Таблица 2

Электрические и излучательные характеристики исследуемых импульсных ксеноновых ламп

Режим	1	2	3	4	5	6	7
R_l , Ом	1,14	1,04	1,21	0,96	1,00	1,15	0,90
I_m , А	660	884	692	1016	901	727	1072
j , кА/см ²	3,4	4,2	3,3	5,2	4,2	3,4	5,1
τ_m , мкс	70	48	37	70	32	33	34
$\tau_{0,5}$, мкс	120	82	54	125	55	62	61
P_m , кВт	499	806	577	983	815	617	1032
P_p , кВт/см ³	212	316	226	417	320	242	405
P_{cp} , кВт/см ³	177	290	212	371	332	233	390
$W_{лз}$, Дж	50	56	27	109	43	34	56
η , %	87,92	91	86	93	94	97	90
$W_{200-300}$, Дж	2,9	4,0	1,9	9,2	3,3	2,2	5,3
$\eta_{200-300}$, %	5,1	6,8	6,2	8,0	7,4	6,3	8,4
$T_{я}$, кК	7,2	8,6	8,2	9,3	8,8	8,1	9,3

Примечание. В таблице введены следующие обозначения: R_l – сопротивление лампы в максимуме мощности, I_m , j – амплитуда импульса тока и плотности тока соответственно; τ_m – время нарастания импульса тока; $\tau_{0,5}$ – длительность импульса тока по уровню 0,5; P_m , P_p , P_{cp} – максимум мощности, пиковый и средней плотности мощности соответственно; $W_{лз}$ – вложенная в лампу энергия; η – эффективность энерговыклада в ксеноновую плазму разрядного контура; $W_{200-300}$, $\eta_{200-300}$ – энергия излучения и излучательная эффективность в спектральном диапазоне 200–300 нм; $T_{я}$ – яркостная температура разряда.

Анализ представленных данных позволяет сделать следующие заключения:

1. В результате исследования спектрального распределения излучения ксеноновой плазмы при работе импульсной лампы в режимах 1, 2 и 4 выявлена практически полная идентичность характера спектра (рис. 1), несмотря на рост средней мощности от 177 до 390 кВт/см³ и яркостной температуры от 7,2 до 9,3 кК. Полученные спектры не соотносятся с приведенными в [11] данными при изменении средней удельной мощности в диапазоне 100–300 кВт/см³. Наблюдаемые расхождения, вероятно, связаны с существенным различиями величины разрядного объема исследуемых ламп (2,4 см³ в нашем случае и 50,3 см³ в работе [11]), что при схожих электрических параметрах разряда приводит к существенному отличию в оптической плотности плазмы.

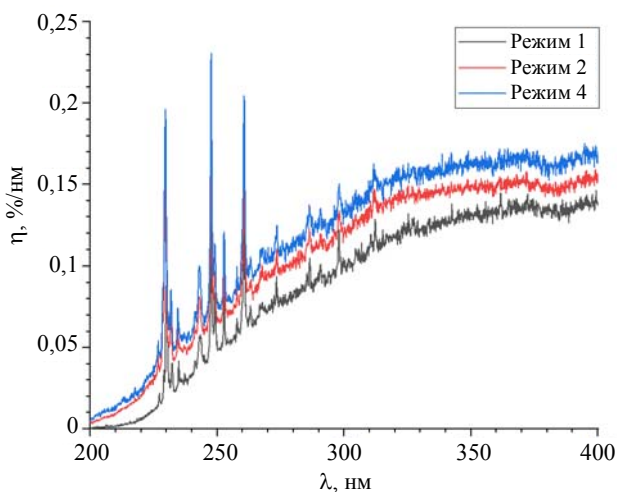


Рис. 1. Спектральное распределение КПД излучения в зависимости от средней объемной плотности мощности.

2. Зависимости излучательной эффективности в диапазоне длин волн 200–300 нм от пиковой P_n и средней P_{cp} плотностей мощности хорошо описываются прямой линией (рис. 2). Однако значительно меньший коэффициент детерминации для пиковой (0,88) по сравнению со средней плотностью мощности (0,96) свидетельствует о худшем согласовании гипотетической зависимости. Функциональная зависимость эффективности излучения в спектральном диапазоне 200–300 нм представлена формулой (2):

$$\eta_{200-300} \approx 2,91 + 1,38 \times 10^{-2} \times P_{cp}. \quad (2)$$

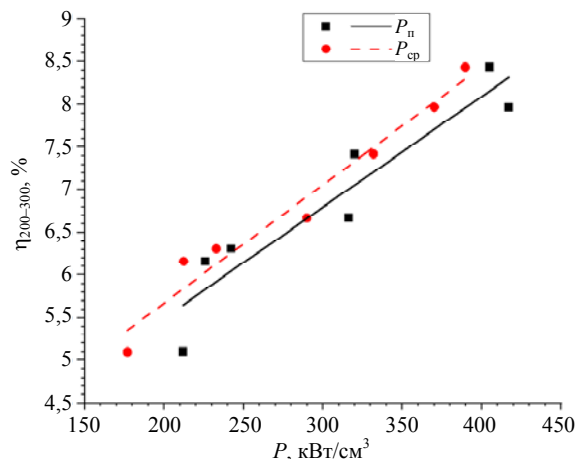


Рис. 2. Зависимость пиковой (P_n) и средней (P_{cp}) плотностей мощности от КПД в спектральном диапазоне 200–300 нм.

Отклонение экспериментальных значений от аппроксимационной функции может объясняться влиянием нескольких факторов: отличием в размерах разрядного объема исследуемых ламп, обусловленное технологическими особенностями изготовления экспериментальных образцов, погрешностью измерения электрических и излучательных характеристик и т. д.

3. Учитывая факт определения яркостной температуры для импульсных ламп в момент максимума яркости наиболее простым предположением является наличие ее зависимости от пиковой объемной плотности мощности. Графическое сравнение показывает близкие по функциональной зависимости кривые логарифмического характера (рис. 3). Коэффициент детерминации для пикового значения незначительно выше (0,96), чем для среднего (0,95), что не позволяет сделать однозначного заключения в пользу одной зависимости.

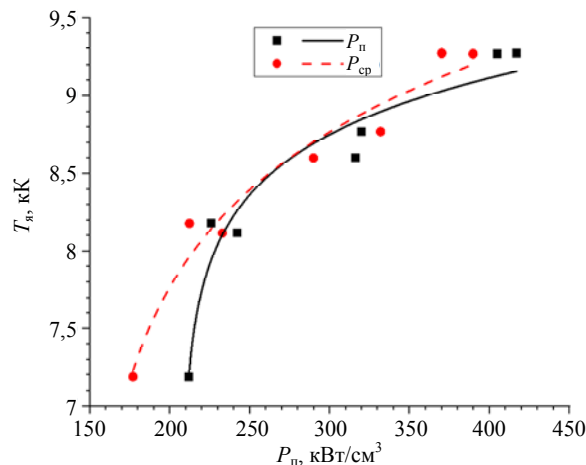


Рис. 3. Зависимость пиковой (P_n) и средней (P_{cp}) плотности мощности от яркостной температуры в диапазоне длин волн 237–267 нм.

Программная обработка полученных экспериментально данных показала, что зависимость яркостной температуры от объемной плотности мощности описывается логарифмическим уравнением:

$$T_{\text{я}} \approx 6,5 \times 10^3 + 5 \times 10^2 \ln(P_{\text{п}} - 2,1 \times 10^2). \quad (3)$$

Полученная линейная зависимость и значения КПД излучения разряда (табл. 2) хорошо согласуются с начальным участком приведенной в работе [4] аналогичной экспериментальной кривой для лампы с внутренним диаметром 7 мм и спектрального диапазона 185–300 нм. Яркостная температура $T_{\text{я}}$ ксеноновой плазмы отличается от приведенной в [4] как по величине (порядка 5 кК в [4] и 9,3 кК по нашим данным), так и по характеру аппроксимируемой кривой, что может быть следствием нескольких факторов:

- отличие в механизме формирования плазменного канала при длительностях разряда в нашем случае в 50 мкс, а в работе [4] порядка 5 мкс. При $\tau = 5$ мкс скорее всего плазма не заполняет полностью разрядный объем, что приводит к дополнительным погрешностям при вычислении яркостной температуры;

- различные характеры развития разряда и заполнения плазмой внутреннего объема лампы также сказываются на длительности квазистационарной стадии и, как следствие, на оптической толщине плазмы;

- описанное автором работы [4] многоканальное нестационарное во времени развитие ксенонового разряда приводит к различной интенсивности излучения в отдельных участках лампы;

- отсутствие в работе [4] описания спектрального диапазона измерения яркости и наблюдаемое занижение $T_{\text{я}}$ в сравнении с полученной в данной работе величиной, возможно, свидетельствует об измерении энергии излучения в более широком диапазоне длин волн;

- логарифмический характер кривой с участком «насыщения» яркостной температуры, полученной в данной работе, может являться следствием хорошо изученного эффекта «обратимой непрозрачности» кварца, имеющего место для разрядов с длительностью больше нескольких микросекунд [12].

Заключение

В работе представлены экспериментальные и расчетные результаты исследования зависимости эффективности УФ-излучения от объемной плотности мощности разряда импульсных ксеноновых ламп с внутренним диаметром 5 мм и межэлектродным расстоянием 120 мм. Установлено, что излучательный КПД в диапазоне длин волн 200–300 нм наиболее точно аппроксимируется прямой в зависимости от средней объемной плотности мощности, а функция $T_{\text{я}} = f(P_{\text{п}})$ носит логарифмический характер. Полученные нами результаты в узком диапазоне значений плотности мощности и на одном типоразмере разрядного объема не позволяют однозначно распространить представленные результаты на все импульсные лампы, но обозначили важность решаемой задачи. В совокупности с актуальностью исследования импульсных газоразрядных ламп в качестве источника УФ-излучения очевидна необходимость проведения последующих исследований в более широких диапазонах объемной плотности мощности, длительности импульса и параметров разрядного промежутка ламп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зверев А. Ю., Борисевич С. В., Четуренков Н. Я., Масякин Д. Н., Ковальчук Е. А., Быков В. А., Труфанова В. В., Тутельян А. В., Тиванова Е. В., Квасова О. А., Акимкин В. Г. // МедАлфавит. 2020. Т. 18. С. 55.
2. Kitagawa H., Mori M., Hara T., Kashiyama S., Shigemoto N., Ohge H. // AJS. 2021. Vol. 49. P. 55.
3. Маршак И. С. Импульсные источники света. – М.: Энергия, 1978.
4. Басов Ю. Г. / Создание импульсных ламп с разрядом микросекундных длительностей для облучения лазерных и фотохимических сред: дис. д. т. наук. Москва. 1982.
5. Басов Ю. Г. Источники накачки микросекундных лазеров. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Belov S. N., Demidov M. I., Ogurtsova N. N., Podmoshenskii I. V., Rogovtsev P. N., Shelemina V. M. // ZPS. 1969. Vol. 10. № 3. P. 408.
7. Гаврилова А. И., Дойников А. С., Пахомов В. К. // Импульсная фотометрия. 1973. № 3. С. 103.
8. Игнатьев В. Г., Подгаецкий В. М. // Квантовая электроника. 1971. № 4. С. 121.
9. Lamp Materials https://www.qsil.com/fileadmin/user_upload/pdf_Dateien/Kataloge/QSIL-Lamp_Materials_e.pdf. [дата обращения: 31.10.2021].
10. Куреев С. Г., Шашковский С. Г., Тумашевич К. А., Абакумов А. В. // Научно-технический вест-

ник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 1. С. 45.

11. Камруков А. С., Кулебякина А. И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп. – М.: ООО НИЦ «Инженер», 2010.

12. Кашиников Г. Н., Орлов В. К., Панин А. Н., Пискунов А. К., Резников В. А. // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 6. С. 1340.

PACS 52.80.Yr

Dependence of the Xe flash lamps' UV radiation efficiency on the volumetric power density of the discharge

S. G. Kireev, S. V. Gavrish, A. I. Kulebyakina, and S. G. Shashkovskiy

Scientific and Industrial Enterprise "Melitta", Ltd
16/10 Mikluho-Maklaya st., Moscow, 117977, Russia
E-mail: kireevsg.melitta@gmail.com

Received October 28, 2021

The study results of the peak and average electrical volumetric power density influence on the radiation efficiency and brightness temperature in the 200–300 nm bactericidal spectrum range are presented. A linear dependence of the radiation efficiency change in the 5.1–8.4 % range was obtained with the average volumetric power density increase from 177 to 390 kW/cm³. The brightness temperature dependence in the specified spectral region on the peak volumetric power density is a logarithmic character with decreasing growth rate when approaching 9 kK. This effect can be associated with both radiation blocking by vaporized quartz fumes and with UV light shielding by outer plasma layers.

Keywords: flash lamp, quartz, radiation, efficiency, brightness temperature, volumetric power density.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-6-24-29

REFERENCES

1. A. Yu. Zverev, S. V. Borisevich, N. Ya. Chepurenkov, D. N. Masyakin, E. A. Kovalchuk, V. A. Bykov, V. V. Trufanova, A. V. Tutelyan, E. V. Tivanova, O. A. Kvasova, and V. G. Akimkin, *Medical alphabet* **18**, 55 (2020) [in Russian].
2. H. Kitagawa, M. Mori, T. Hara, S. Kashiyama, N. Shigemoto, and H. Ohge, *AJIC*, **49**, 55 (2021).
3. I. S. Marshak, *Pulsed light sources* (Springer US, New York, 1984; Energia, Moscow, 1978).
4. Yu. G. Basov, *Sozdanie impul'snyh lamp s razryadom mikrosekundnyh dlitel'nostej dlya oblucheniya lazernyh i fotohimicheskikh sred* (PHD work, Moscow, 1982) [in Russian].
5. Yu. G. Basov, *Istochniki nakachki mikrosekundnyh lazerov* (Energoatomizdat, Moscow, 1990) [in Russian].
6. S. N. Belov, M. I. Demidov, N. N. Ogurtsova, I. V. Podmoshenskii, P. N. Rogovtsev, and V. M. Shelemina, *ZPS* **10** (3), 408 (1969).
7. A. I. Gavrilova, A. S. Dojnikov, and V. K. Pahomov, *Impul'snaya fotometriya* **3**, 103 (1973) [in Russian].
8. V. G. Ignat'ev and V. M. Podgaetskii, *Sov. J. Quantum Electron* **1**, 415 (1972).
9. Lamp Materials https://www.qsil.com/fileadmin/user_upload/pdf_Dateien/Kataloge/QSIL-Lamp_Materials_e.pdf. [date: 31 october 2021].
10. S. G. Kireev, S. G. Shashkovskiy, K. A. Tumashevich, and A. V. Abakumov, *Sci. Tech. J. Inf. Technol. Mech. Opt.* **20** (1), 45 (2020) [in Russian].
11. A. S. Kamrukov and A. I. Kulebyakina, *Engineering calculation methods for characteristics of flash xenon lamps* (NITs «Engineer», Moscow, 2010) [in Russian].
12. G. N. Kashnikov, V. K. Orlov, A. N. Panin, A. K. Piskunov, and V. A. Reznikov, *Sov. J. Quantum Electron* **10**, 768 (1980).