

УДК 535.247, 535.243, 621.387

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-45-51

МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ЛАМП

С.Г. Киреев, С.Г. Шашковский, К.А. Тумашевич, А.В. Абакумов

ООО «Научно-производственное предприятие «Мелитта», Москва, 117997, Российская Федерация

Адрес для переписки: kireevsg.melitta@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 03.10.19, принята к печати 19.12.19

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Киреев С.Г., Шашковский С.Г., Тумашевич К.А., Абакумов А.В. Метод вычисления энергоэффективности газоразрядных импульсных ламп // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 1. № 1. С. 45–51. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-45-51

Аннотация

Предмет исследования. Представлена методика, позволяющая проводить совместное измерение энергетического спектра излучения и электрических параметров сильнооточного импульсного дугового разряда. Представленный подход позволяет вычислять энергетические и мощностные характеристики разряда, а также эффективность преобразования электрической энергии в излучательную в различных спектральных диапазонах. **Метод.** Вычисление энергоэффективности импульсных ламп проводится при помощи двух отдельных методик: измерение электрических параметров газового разряда и регистрация энергетического спектра излучения. Для регистрации электрических параметров была применена схема, использующая коаксиальный безындуктивный шунт для измерения импульсного тока и три объединенных своими земляными выводами делителя напряжения смешанного типа для измерения падений напряжений на лампе и конденсаторе. Объединение земляных выводов позволяет одновременно регистрировать падение напряжения в разных точках без риска преждевременного отказа осциллографа. Математическими методами получены энергетические и мощностные характеристики контура и импульсного газового разряда. Измерение излучательных характеристик выполнено с помощью спектрометра и калиброванного фотодиодного приемника излучения. Получено спектральное распределение источника излучения, и найдена эффективность излучения в выбранных интервалах длин волн. **Основные результаты.** На примере импульсной газоразрядной лампы с ксеноновым наполнением, внутренним диаметром 5 мм и межэлектродным расстоянием 120 мм получены согласованные по времени осциллограммы тока и падения напряжений на конденсаторе и лампе. Вычисленные значения эффективности излучения в спектральных диапазонах 200–250, 200–300 и 200–400 нм составили соответственно 2,7, 9,3 и 28 %. **Практическая значимость.** Предложенный способ позволяет проводить одновременную регистрацию тока, падения напряжения на нескольких участках разрядной цепи и излучательных характеристик, что исключает необходимость учета изменения нестабильности указанных параметров от импульса к импульсу. Вычисление эффективности излучения в любом диапазоне длин волн, входящим в спектральный интервал чувствительности спектрометра, позволяет разработчикам систем с импульсными лампами оптимизировать разрядный контур, исходя из радиационных требований конкретных прикладных задач.

Ключевые слова

импульсная лампа, спектр, излучение, эффективность, ток, напряжение, сильнооточный разряд, измерение, ультрафиолет, импульс

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-45-51

ENERGY EFFICIENCY CALCULATION OF GAS-DISCHARGE FLASH LAMPS

S.G. Kireev, S.G. Shashkovskiy, K.A. Tumashevich, A.V. Abakumov

Scientific and Industrial Enterprise “Melitta”, Ltd, Moscow, 117997, Russian Federation

Corresponding author: kireevsg.melitta@gmail.com

Article info

Received 03.10.19, accepted 19.12.19

Article in Russian

For citation: Kireev S.G., Shashkovskiy S.G., Tumashevich K.A., Abakumov A.V. Energy efficiency calculation of gas-discharge flash lamps. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 45–51 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-45-51

Abstract

Subject of Research. The paper presents a technique for simultaneous measurement of the radiation energy spectrum and the electrical parameters of a high-current pulsed arc discharge. The proposed approach provides the calculation of the energy and power parameters of the discharge and the efficiency of electric energy conversion into radiative one in different spectral ranges. **Method.** The energy efficiency of flash lamps was calculated by two separate methods: the measurement of gas discharge electrical parameters and detection of radiation energy spectrum. The electrical parameters were measured by assembling a circuit using a coaxial non-inductive shunt and three mixed-type voltage dividers combined with their earth terminals at one point for fall-of-potential measurement on the lamp and capacitor. The combining of earth terminals made it possible to register simultaneously the voltage drop at different points without the risk of oscilloscope failure. By the mathematical multiplication and integration, the energy and power characteristics of the circuit and the pulsed gas discharge were obtained. The radiation characteristics measurements were carried out by applying a spectrometer and calibrated photodiode radiation detector. The spectral distribution of the radiation source was obtained and radiation efficiency was specified in the chosen wavelength intervals. By calculating the radiation energy in the spectral range corresponding to the applied task and taking into account the previously obtained values of the dissipated energies in the circuit and discharge, the radiation efficiency is found in the selected wavelength ranges.

Main Results. On xenon flash lamp example with 5 mm internal diameter and arc length of 120 mm, oscillograms of the current and voltage drop on the capacitor and lamp were obtained. The calculated radiation efficiency values in the spectral ranges of 200–250, 200–300 and 200–400 nm were 2.7, 9.3, and 28 %, respectively. **Practical Relevance.** The proposed method gives the possibility to register simultaneously the current and voltage drop on several sections of the discharge circuit and radiation characteristics, and eliminates the necessity to take into account the instability of these parameters from pulse to pulse. The calculation of the radiation efficiency in any wavelength range included in the spectral interval of the spectrometer sensitivity enables the designers of systems with flash lamps to optimize the discharge circuit based on the radiation requirements of specific applications.

Keywords

flash lamp, spectrum, radiation, efficiency, current, voltage, high-current discharge, measurement, ultraviolet, pulse

Введение

Импульсные газоразрядные лампы (ИГЛ) конструктивно представляют собой оптически прозрачную колбу с запаянными в нее электродами и наполненную инертным газом, как правило, ксеноном. Приложение высокого напряжения к электродам инициирует сильный импульсный дуговой разряд, разогревающий газ в лампе до температуры выше 12 кК. Высокая температура и импульсный характер тока позволяют получить такие радиационные параметры, как сплошной спектр излучения в широком спектральном диапазоне от вакуумного ультрафиолетового (УФ) до ближнего инфракрасного и высокую мощность излучения [1].

Сочетание этих параметров привлекает интерес в разнообразных сферах. Однако решение различных прикладных задач требует генерации излучения в разных интервалах длин волн. Для обеззараживания объектов наиболее эффективное излучение лежит в диапазоне длин волн 200–300 нм [2, 3], преимущественно воздействующее на ДНК. Коротковолновая часть УФ-излучения 190–230 нм ответственна за фотоин-активацию белков [4], а УФ-диапазона А (315–400 нм) в большей степени оказывает влияние на мембрану клеток [5, 6]. Для фотохимической деструкции сложных органических соединений необходимо излучение с длиной волны ниже 250 нм [7], хлоринов — вплоть до 350 нм [8]. Современный способ очистки воды различного характера загрязнения при помощи короткоживущих радикалов (технология Advanced Oxidation Process) с одной стороны может требовать фотоны с длиной волны короче 270 нм для фотоиндуцированного разложения пероксида водорода [9], с другой — в диапазоне

185–400 нм для инициирования реакции восстановления Fe(II) в процессе «Фото-Фентон» [10].

Таким образом, наиболее важной прикладной задачей является оптимизация спектрального состава источника излучения под конкретные требования.

Энергоэффективность импульсных газоразрядных ламп

Существенным параметром любого преобразователя электрической энергии является его эффективность, которая для источников излучения вычисляется по соотношению излученной энергии в рассматриваемом спектральном диапазоне к запасенной в конденсаторной батарее или вложенной в разряд. Однако решение обеих задач (фотометрической и электрической) для импульсных ламп связано с рядом сложностей.

Вычисление запасенной и вложенной в разряд электрических энергий требует одновременной регистрации импульсного тока и падений напряжений на обкладках разрядной емкости и электродах лампы. Однако при наиболее распространенной схеме с последовательным инициированием разряда [1], при которой между лампой и конденсатором находится высоковольтный трансформатор с существенным омическим сопротивлением, разность потенциалов между конденсатором и лампой может превышать сотни вольт. Подключенные в точках с настолько разными потенциалами делители напряжения объединяют свои земляные контакты в осциллографе. Использование стандартного осциллографа с общей землей между всеми каналами при таком измерении грозит его преждевременным отказом. Осциллографы с изолированной землей между каналами значительно сложнее и дороже. Несмотря на то, что для определения

электрических параметров сильнооточных импульсных разрядов короткой длительности разработано достаточно количество средств и методик [11, 12], все они направлены на измерение разности потенциалов между двумя точками и не решают задачу одновременного измерения падений напряжения на двух участках контура (лампе и конденсаторе) с различными потенциалами в каждой из точек.

Регистрация радиационных параметров импульсно-высокоинтенсивного излучения сплошного спектра также связана с рядом сложностей. Во-первых, необходим калиброванный на высокоинтенсивное излучение фотоприемник, что требует наличия эталонного высокоинтенсивного источника излучения. Во-вторых, для измерения энергии излучения в определенном интервале длин волн необходимо его выделение желательно без корректировки исходного спектрального распределения.

Широко применяются методики радиационного исследования источников излучения постоянного горения:

- фотоэлектрическая, основанная на внутреннем или внешнем фотоэффекте;
- фотохимическая, работающая за счет изменения оптических или физических свойств вещества прямо пропорционального числу поглощенных фотонов;
- пирозлектрическая — за счет возникновения в кристалле электрического поля, пропорционального изменению его температуры.

Перечисленные методики работают по схожему принципу относительно монохроматического излучения — заранее проводимая калибровка приемника излучения на интересующей длине волны позволяет получить коэффициент пропорциональности между облученностью фоточувствительной площадки и реакцией на нее. Последующие измерения интересующих ламп, в основном пренебрегая фактом уширения спектральных линий, сводятся к учету полученного коэффициента, площади облучаемой поверхности, телесного угла и расстояния между источником и приемником излучения.

Использование такого принципа при измерении импульсных источников сплошного спектра излучения накладывает дополнительные требования: быстродействие и учет спектрального распределения источника света. И если в быстродействующих приборах на данный момент нет дефицита, то задача учета сложного спектрального состава излучения и выделения из него различных спектральных диапазонов для решения широкого ряда прикладных задач вызывает трудности.

Методика, апробированная в статье [13], показала принципиально новый подход к измерению импульсного излучения за счет системы из коаксиального фотоэлемента ФЭК-22СПУ и спектрометра. Коэффициент пересчета получается при учете спектральной чувствительности ФЭК-22СПУ на зарегистрированном спектрометром относительном спектральном распределении. Таким образом, авторы сумели получить абсолютный спектр излучения в диапазоне регистрации спектрометрического прибора. Единственным существенным недостатком данной методики явля-

ется выбранный фотоэлемент — сложно калибруемый источниками постоянного горения, и как следствие, обладающий высоким значением погрешности. Совокупное значение погрешности методики составило около 18 %.

За счет использования фотодиода с интегрирующей цепочкой удалось устранить недостатки фотоэлемента ФЭК-22СПУ. Простота и надежность калибровки по источникам постоянного горения с погрешностью приблизительно 5 %, а также дешевизна и доступность таких фотоприемников позволяет рассматривать предлагаемую методику [14] в качестве альтернативы существующим.

В работе рассмотрена методика одновременного измерения радиационных и электротехнических параметров импульсного источника излучения с последующим вычислением эффективности излучения в различных спектральных интервалах. На примере лампы с межэлектродным расстоянием 120 мм и внутренним диаметром 5 мм приведены результаты измерения и последующего расчета энергопотенциальных параметров плазмы и контура, а также эффективности излучения в различных спектральных интервалах.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовалась импульсная ксеноновая лампа с внутренним диаметром 5 мм и межэлектродным расстоянием 120 мм, устанавливаемая на расстоянии D от системы регистрации излучательных характеристик.

Для экспериментальных исследований электрических и радиационных характеристик лампы был собран стенд, принципиальная схема которого показана на рис. 1. Конденсатор C_0 емкостью 120 мкФ заряжался до напряжения около 1,38 кВ. Инициирование разряда осуществлялось с помощью высоковольтного импульса амплитудой примерно 24 кВ. Индуктивность и сопротивление контура составили ориентировочно 16 мкГн и 60 мОм соответственно.

Разрядный ток регистрировался с помощью калиброванного коаксиального безындуктивного токового шунта SDN-001 с минимальным временем нарастания сигнала 30 нс и сопротивлением 1,012 мОм, что на три порядка ниже сопротивления плазменного канала. Шунт располагался между конденсатором и поджигаемым трансформатором, что позволило исключить влияние высоковольтного импульса инициализации разряда на осциллограмму разрядного тока.

Падение напряжения регистрировалось как на разрядном промежутке лампы, так и на конденсаторе с помощью трех малоиндуктивных делителей напряжения смешанного типа Pintek HVP-39Pro со временем нарастания, не превышающим 2 нс. Первый делитель напряжения устанавливался между обкладками конденсатора, второй и третий крепились сигнальными выводами к электродам лампы, а земляными — к минусовой обкладке конденсатора. Полученные временные зависимости падения напряжения со второго и третьего делителей напряжения вычитались друг из друга, в ре-

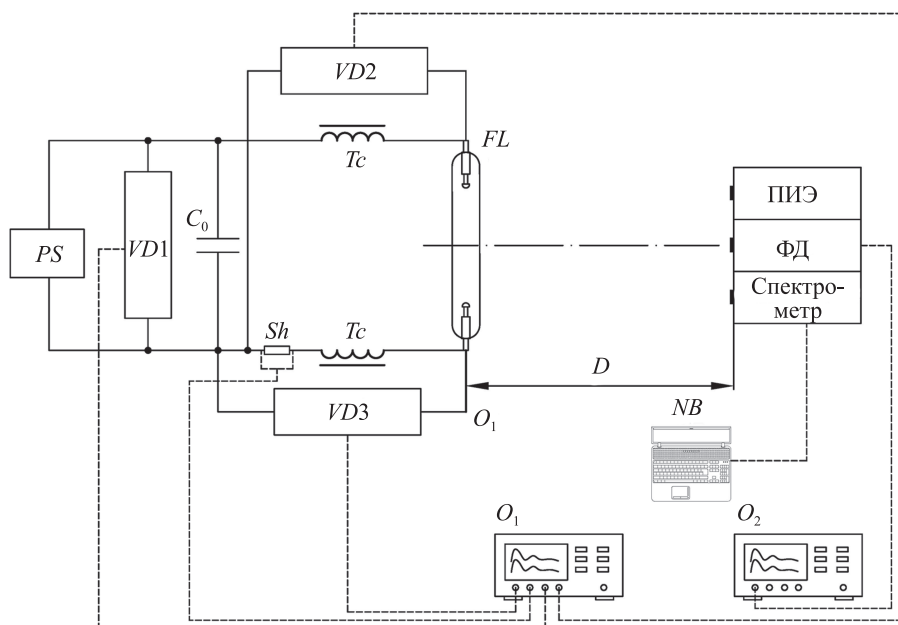


Рис. 1. Принципиальная схема диагностического измерительного стенда.

PS — зарядный блок; $VD1$, $VD2$, $VD3$ — делители напряжения; C_0 — разрядный конденсатор; Sh — безындуктивный шунт; T_c — катушка поджига; FL — импульсная газоразрядная лампа; O_1 , O_2 — осциллографы; NB — ноутбук; ПИЭ — пирозлектрический измеритель энергии (компания «Офир»); ФД — фотодиодный приемник излучения; D — расстояние от импульсной газоразрядной лампы до системы регистрации излучательных характеристик

зультате чего была получена временная характеристика падения напряжения на лампе. За счет такого подключения на осциллограф с общей земляной шиной между каналами подаются сигналы с одинаковыми земляными потенциалами. Отсутствие разности потенциалов между соединенными точками устраняет ее влияние на результат и снижает вероятность отказа осциллографа.

Сигналы с токового шунта и всех делителей напряжения выводились на четырехканальный осциллограф TDS2024C. Такая схема подключения делителей напряжения позволяет измерять потенциалы в необходимом количестве точек разрядного контура без риска выхода из строя осциллографа.

Таким образом, удалось за один импульс записать согласованные между собой по времени осциллограммы тока, падения напряжения на лампе и конденсаторе.

Дальнейшая обработка осциллограмм заключалась в вычислении импульсной мощности, вкладываемой в контур и лампу, путем перемножения соответствующих осциллограмм тока и напряжения, и вычисления электрической энергии в контуре и лампе, полученной за счет интегрирования мощности.

Регистрация энергетического спектра излучения проводилась за счет сочетания фотодиодного приемника (ФД) излучения SGLux SG01D-C18 со временем нарастания сигнала, не превышающим 15 нс, и оптоволоконного спектрометра просветленного типа с высокой чувствительностью в УФ-диапазоне AvaSpec-ULS2048-USB2 [14]. ФД был собран по схеме с усилителем сигнала, построенным на операционных усилителях с частотными характеристиками, значительно превышающими длительность импульса излучения ИГЛ, и интегрирующей цепочкой. Собранный приемник излучения представляет собой регистратор энергии излучения,

который достаточно просто калибруется по источникам постоянного горения. Для ФД предварительно была проведена калибровка с получением спектрального распределения относительной чувствительности, нормированной на его максимальное значение, и значения вольтовой чувствительности, характеризующей ее применительно к схеме включения приемника, на длине волны максимума чувствительности [15].

Измерение полной энергии излучения проводилось при помощи калиброванного чернотельного приемника излучения Ophir PE50BB-DIF, обладающего наиболее постоянной спектральной чувствительностью во всем диапазоне регистрации (0,19–20 мкм).

Экспериментальная отработка методики

Для ИГЛ в исследованном разрядном контуре получены временные зависимости энергопотенциальных характеристик, графически показанные на рис. 2. Характер тока I был аperiodическим с максимальным значением $I \approx 1$ кА и временем достижения максимума около 66 мкс. Такие значения свидетельствуют о высокоярком характере излучения плазмы. Оценка яркостной температуры в приближении абсолютно черного тела в спектральном диапазоне регистрации ФД дает значения 8,5 кК. Напряжение на обкладках конденсатора U_k превышает напряжение на электродах лампы U_d до 76 мкс.

Максимум мощности в лампе ($P_d \approx 0,98$ МВт) отстает от максимума рассеиваемой в контуре мощности ($P_k \approx 1,1$ МВт) на 14 мкс. Этот факт объясняется наличием в разрядном контуре значительной индуктивности за счет используемого тороидального трансформатора иницирования импульса, а также нелинейным харак-

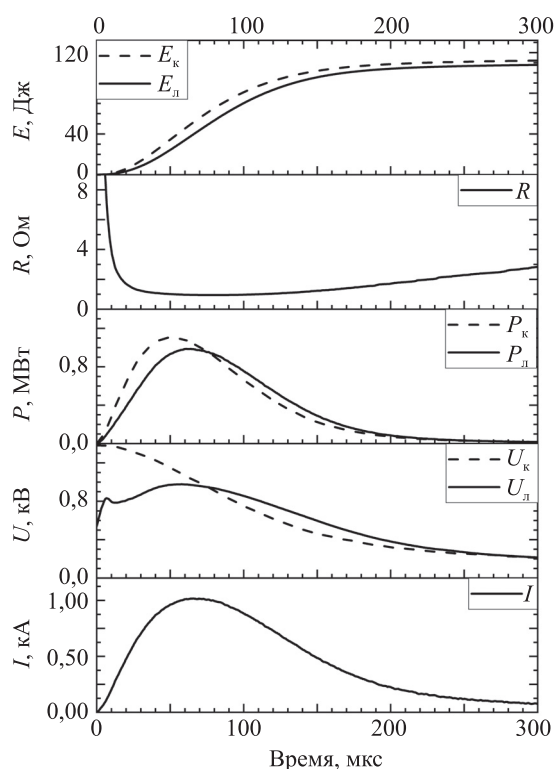


Рис. 2. Энергомощностные параметры разрядного контура при $U_C = 1,38$ кВ, $C = 120$ мкФ. Индекс «к» указывает на параметр в контуре, индекс «л» — в лампе.

I — разрядный ток; U — напряжение; P — мощность; E — электрическая энергия; R — сопротивление плазменного канала.

тером изменения сопротивления разрядного канала. Сопротивление плазменного канала в момент максимума мощности составило $R \approx 0,95$ Ом. Эффективность энерговклада в плазму, вычисленная по отношению рассеиваемой в лампе ($E_{\text{л}} \approx 108$ Дж) к запасенной в конденсаторе ($E_{\text{к}} \approx 114$ Дж) энергий, составила около 94 %, что свидетельствует о хорошем согласовании контура с лампой и относительно небольшом значении паразитного сопротивления.

Исследование радиационных характеристик разряда позволило получить спектральное распределение излу-

Таблица. Эффективность излучения в различных спектральных диапазонах

Спектральный диапазон, нм	Энергия излучения, Дж	Эффективность излучения, %
200–250	3,1	2,7
200–300	10,6	9,3
200–400	31,9	28,0

чения в абсолютных единицах и, отнеся его к запасенной в конденсаторе энергии, построить спектральную эффективность излучения (рис. 3, а). Ее интегрирование по длине волны дает эффективность излучения, приведенную на рис. 3, б.

Из спектральных распределений получены значения энергий и эффективностей излучения для указанных ранее прикладных задач (таблица). Так, например, в диапазоне 200–300 нм, наиболее актуальном в сфере обеззараживания, энергия УФ-излучения составила 10,6 Дж, что составляет 9,3 % от запасенной в конденсаторе энергии. Измеренная пироэлектрическим датчиком полная энергия излучения составила 82,1 Дж или 76 % от рассеиваемой в лампе энергии. Потери обусловлены относительно высоким значением яркостной температуры, при которой существенная часть излучаемой энергии генерируется в вакуумном УФ-диапазоне и поглощается стенкой лампы и воздухом.

Особенности генерации излучения в импульсных лампах позволяют за счет варьирования параметров разрядного контура и разрядного промежутка ИГЛ, состава и давления газового наполнения изменять спектральное распределение излучения. Например, снижение индуктивности контура и разрядной емкости при увеличении напряжения приводит к увеличению выхода излучения в УФ-области [16], в то время как противоположные меры позволяют поднять эффективность преобразования электрической энергии в видимом диапазоне спектра [17].

Таким образом, используя предложенную методику вычисления эффективности излучения, появляется возможность оптимизировать систему, состоящую из ИГЛ и разрядного контура, под конкретную прикладную

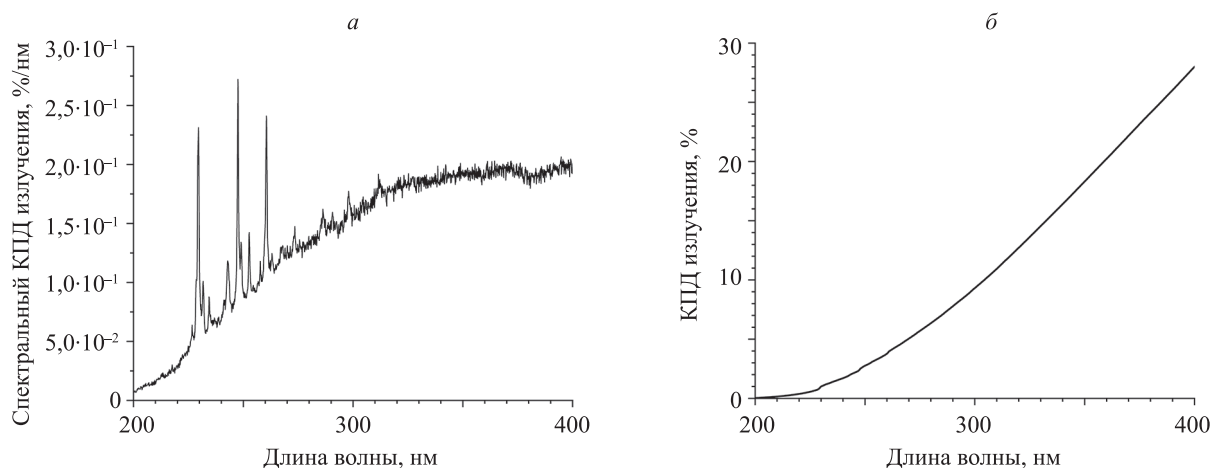


Рис. 3. Коэффициенты полезного действия излучения импульсной лампы: спектральный (а); интегральный (б)

задачу. Одновременная регистрация радиационных и электрических характеристик разряда позволяет исключить из расчета необходимость учета нестабильности излучательных параметров от импульса к импульсу, которая может достигать 10 % [1].

Заключение

В работе представлена и апробирована методика совместных электротехнических и радиационных измерений сильноточного разряда сплошного спектра излучения с целью получения значений эффективности излучения в различных спектральных диапазонах. На

примере лампы с внутренним диаметром 5 мм и межэлектродным расстоянием 120 мм вычислены временные зависимости мощности, сопротивления и энергии разряда. Совокупность измеренных параметров позволила вычислить эффективность излучения как во всем спектральном диапазоне, так и в различных прикладных диапазонах длин волн.

Предложенная в работе методика позволит разработчикам устройств с импульсными газоразрядными лампами проводить оптимизацию электротехнического контура с целью максимизации излучения в требуемом задаче спектральном диапазоне.

Литература

1. Маршак И.С., Дойников А.С., Жильцов В.П. и др. Импульсные источники света / под общ. ред. И.С. Маршака. М.: Энергия, 1978. 472 с.
2. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. UVGI for Air and Surface Disinfection*. NY: Springer, 2009. 501 p.
3. Beck S.E., Wright H.B., Hargy T.M., Larason T.C., Linden K.G. Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems // *Water research*. 2015. V. 70. P. 27–37. doi: 10.1016/j.watres.2014.11.028
4. Рубин А.Б. Биопизика. Т. 2: Биопизика клеточных процессов. М.: Издательство Московского университета, 2004. 469 с.
5. Vermeulen N., Keeler W.J., Nandakumar K., Leung K.T. The bactericidal effect of ultraviolet and visible light on *Escherichia coli* // *Biotechnology and Bioengineering*. 2008. V. 99. N 3. P. 550–556. doi: 10.1002/bit.21611
6. Santos A.L., Oliveira V., Baptista I., Henriques I., Gomes N.C.M., Almeida A., Correia A., Cunha A. Wavelength dependence of biological damage induced by UV radiation on bacteria // *Archives of Microbiology*. 2013. V. 195. N 1. P. 63–74. doi: 10.1007/s00203-012-0847-5
7. Blystone P.G., Johnson M.D., Haag W.R., Daley P.F. Advanced ultraviolet flash lamps for the destruction of organic contaminants in air // *ACS Symposium Series*. 1993. V. 518. P. 380–392. doi: 10.1021/bk-1993-0518.ch018
8. Wang D., Bolton J.R., Hofmann R. Medium pressure UV combined with chlorine advanced oxidation for trichloroethylene destruction in a model water // *Water research*. 2012. V. 46. N 15. P. 4677–4686. doi: 10.1016/j.watres.2012.06.007
9. Ho T.-F.L., Bolton J.R., Lipczynska-Kochany E. Quantum yields for the photodegradation of pollutants in dilute aqueous solution: phenol, 4-chlorophenol and N-nitrosodimethylamine // *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. 1996. V. 1. N 2. P. 170–178. doi: 10.1515/jaots-1996-0210
10. Parsons S. *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*. London: IWA Publishing, 2004. 356 p.
11. Akiyama H., Kristiansen M., Krompholz H., Maas B. Current-voltage characteristics of a high-current pulsed discharge in air // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1988. V. 16. N 2. P. 312–316. doi: 10.1109/27.3830
12. Schon K. *High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques: Fundamentals, Measuring Instruments, Measuring Methods*. Heidelberg: Springer, 2013. 264 p.
13. Ломаев М.И., Рыбка Д.В. Определение спектральной плотности энергии полихроматического излучения в абсолютных единицах // *Приборы и техника эксперимента*. 2006. № 3. С. 111–114.
14. Киреев С.Г., Архипов В.П., Шашковский С.Г., Козлов Н.П. Измерение спектрально-энергетических характеристик импульсных источников излучения сплошного спектра // *Фотоника*. 2017. № 8(68). С. 48–56. doi: 10.22184/1993-7296.2017.68.8.48.56
15. Киреев С.Г., Тумашевич К.А., Шашковский С.Г., Абакумов А.В., Осин Н.А. Калибровка фотоэлектрических приемников импульсного излучения // *Известия высших учебных заведений. Физика*. 2019. Т. 62. № 11. С. 79–84. doi: 10.17223/00213411/62/11/79
16. Басов Ю.Г. Мощный импульсный ксеноновый разряд короткой длительности в кварцевых трубках // *Электронная техника. Серия*

References

1. Marshak I.S. *Pulsed Light Sources*. NY: Springer, 1984. 461 p.
2. Kowalski W. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. UVGI for Air and Surface Disinfection*. NY: Springer, 2009. 501 p.
3. Beck S.E., Wright H.B., Hargy T.M., Larason T.C., Linden K.G. Action spectra for validation of pathogen disinfection in medium-pressure ultraviolet (UV) systems. *Water research*, 2015, vol. 70, pp. 27–37. doi: 10.1016/j.watres.2014.11.028
4. Rubin A.B. *Biophysics. Vol. 2. Biophysics of Cellular Processes*. Moscow, Moscow State University Publ., 2004. 464 p. (in Russian)
5. Vermeulen N., Keeler W.J., Nandakumar K., Leung K.T. The bactericidal effect of ultraviolet and visible light on *Escherichia coli*. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, vol. 99, no. 3, pp. 550–556. doi: 10.1002/bit.21611
6. Santos A.L., Oliveira V., Baptista I., Henriques I., Gomes N.C.M., Almeida A., Correia A., Cunha A. Wavelength dependence of biological damage induced by UV radiation on bacteria. *Archives of Microbiology*, 2013, vol. 195, no. 1, pp. 6374. doi: 10.1007/s00203-012-0847-5
7. Blystone P.G., Johnson M.D., Haag W.R., Daley P.F. Advanced ultraviolet flash lamps for the destruction of organic contaminants in air. *ACS Symposium Series*, 1993, vol. 518, pp. 380–392. doi: 10.1021/bk-1993-0518.ch018
8. Wang D., Bolton J.R., Hofmann R. Medium pressure UV combined with chlorine advanced oxidation for trichloroethylene destruction in a model water. *Water research*, 2012, vol. 46, no. 15, pp. 4677–4686. doi: 10.1016/j.watres.2012.06.007
9. Ho T.-F.L., Bolton J.R., Lipczynska-Kochany E. Quantum yields for the photodegradation of pollutants in dilute aqueous solution: phenol, 4-chlorophenol and N-nitrosodimethylamine. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 1996, vol. 1, no. 2, pp. 170–178. doi: 10.1515/jaots-1996-0210
10. Parsons S. *Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment*. London, IWA Publishing, 2004. 356 p.
11. Akiyama H., Kristiansen M., Krompholz H., Maas B. Current-voltage characteristics of a high-current pulsed discharge in air. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1988, vol. 16, no. 2, pp. 312–316. doi: 10.1109/27.3830
12. Schon K. *High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques: Fundamentals, Measuring Instruments, Measuring Methods*. Heidelberg, Springer, 2013. 264 p.
13. Lomaev M.I., Rybka D.V. Calculation of absolute values of the spectral energy density of polychromatic radiation. *Instruments and Experimental Techniques*, 2006, vol. 49, no. 3, pp. 399–402. doi: 10.1134/S0020441206030171
14. Kireev S.G., Arkhipov V.P., Shashkovsky S.G., Kozlov N.P. Measurement of spectral and energy characteristics of pulsed radiation sources of continuous spectrum. *Photonics Russia*, 2017, no. 8(68), pp. 48–56. (in Russian). doi: 10.22184/1993-7296.2017.68.8.48.56
15. Kireev S.G., Tumashevich K.A., Shashkovskiy S.G., Abakumov A.V., Osin N.A. Calibration method of photoelectric pulsed radiation detectors. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2019, vol. 62, no. 11, pp. 79–84. (in Russian). doi: 10.17223/00213411/62/11/79
16. Basov Yu.G. Powerful pulsed xenon discharge of short duration in quartz tubes. *Electronic equipment. Series 4: Electrovacuum and gas-discharge devices*, 1985, vol. 3, no. 108, pp. 24–33. (in Russian)

- 4: Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1985. Т. 3. № 108. С. 24–33.
17. Басов Ю.Г., Морозова С.Г., Токарева А.Н. Спектрально-временные характеристики излучения импульсного разряда в смесях инертных газов // Журнал прикладной спектроскопии. 1975. Т. 23. № 4. С. 590–595.
17. Basov Yu.G., Morozova S.G., Tokareva A.N. Time-dependent spectra from pulsed discharges in mixtures of inert gases. *Journal of Applied Spectroscopy*, 1975, vol. 23, no. 4, pp. 1309–1313. doi: 10.1007/BF00618072

Авторы

Киреев Сергей Геннадьевич — начальник научно-технической лаборатории, ООО «Научно-производственное предприятие «Мелитта», Москва, 117997, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-8726-3668, kireevsg.melitta@gmail.com

Шашковский Сергей Геннадьевич — кандидат технических наук, главный конструктор, ООО «Научно-производственное предприятие «Мелитта», Москва, 117997, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-8197-8742, melitta916@gmail.com

Тумашевич Константин Александрович — инженер-исследователь, ООО «Научно-производственное предприятие «Мелитта», Москва, 117997, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-2014-2183, alvaisari@gmail.com

Абакумов Анатолий Владимирович — инженер-электроник, ООО «Научно-производственное предприятие «Мелитта», Москва, 117997, Российская Федерация, el143pro@yahoo.com

Authors

Sergey G. Kireev — Head of Research Laboratory, Scientific and Industrial Enterprise “Melitta”, Ltd, Moscow, 117997, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-8726-3668, kireevsg.melitta@gmail.com

Sergey G. Shashkovskiy — PhD, Chief Designer, Scientific and Industrial Enterprise “Melitta”, Ltd, Moscow, 117997, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-8197-8742, melitta916@gmail.com

Konstantin A. Tumashevich — R&D Engineer, Scientific and Industrial Enterprise “Melitta”, Ltd, Moscow, 117997, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-2014-2183, alvaisari@gmail.com

Anatoliy V. Abakumov — Electronic Engineer, Scientific and Industrial Enterprise “Melitta”, Ltd, Moscow, 117997, Russian Federation, el143pro@yahoo.com