

ВЫСОКОЯРКОСТНЫЙ БАКТЕРИЦИДНЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА В КСЕНОНЕ

С. Г. Киреев*, А. И. Кулебякина, С. Г. Шашковский

УДК 535-31;546.295

ООО “Научно-производственное предприятие “Мелитта”,
117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10, Россия; e-mail: kireevsg.melitta@gmail.com

(Поступила 11 апреля 2019)

Исследованы излучательные характеристики сильнотоочных короткодуговых импульсных разрядов в ксеноне при рабочем напряжении от 0.5 до 2.0 кВ, энергии разряда от 0.25 до 8.0 Дж, давлении ксенона 4.0 и 6.5 атм и межэлектродном расстоянии 4 и 6 мм. Получены высокие значения радиационных потоков в области спектра 200–300 нм, соответствующей бактерицидному действию, что позволяет рассматривать короткодуговую ксеноновую лампу в качестве перспективного источника УФ излучения для применения в бактерицидных устройствах различного назначения.

Ключевые слова: импульс, ультрафиолетовое излучение, шаровая лампа, яркость, яркостная температура.

The radiating characteristics of high-current short-arc pulsed discharges in xenon have been investigated at operating voltages from 0.5 to 2.0 kV, discharge energies from 0.25 to 8.0 J, xenon pressures of 4.0 and 6.5 atm, and interelectrode distance of 4 and 6 mm. High radiation fluxes are obtained in the spectral range 200–300 nm corresponding to a bactericidal effect, which allows us to consider the short-arc xenon lamp as a promising source of UV radiation for use in bactericidal devices for various purposes.

Keywords: pulse, ultraviolet radiation, short-arc lamp, brightness, brightness temperature.

Введение. Устройства на основе импульсных высокояркостных источников излучения сплошного спектра [1–3] получают все большее распространение и практическое применение в квантовой электронике, электронной промышленности, санитарии, медицине, косметологии и т. д. Одна из актуальных задач современной дезинфектологии — разработка новых физических методов обеззараживания помещений с целью снижения частоты заболеваний внутрибольничными инфекциями. Внедрение импульсных УФ технологий и установок на их основе для обеззараживания помещений [2, 4, 5] подтвердило их высокую биоцидную и эпидемиологическую эффективность как в России, так и за ее пределами.

Наиболее широкое применение в таких устройствах получили трубчатые импульсные ксеноновые лампы, обладающие высокой энергетической эффективностью (до 95 %) и светоотдачей (до 80 %) [6]. Однако ограниченные кварцевой стенкой сильнотоочные электрические разряды обладают рядом принципиальных физических ограничений по уровню вкладываемой в разряд мощности и энергии, высокие значения которых вызывают обратимую непрозрачность кварца, интенсификацию плазменно-химических процессов на внутренней поверхности стенки, что приводит к многократному снижению ресурса лампы.

Свободными от этих недостатков могут считаться импульсные ксеноновые лампы со свободно расширяющимся каналом разряда и высоким давлением газа — шаровые лампы. Для них характерны короткая длительность разряда, высокая мощность и яркость излучения (>10 кК), сплошной спектр излучения и высокая эффективность генерации излучения в коротковолновой УФ области (200–300 нм) [7, 8].

HIGH-BRIGHTNESS BACTERICIDAL LIGHT SOURCE BASED ON SPARK DISCHARGE IN XENON

S. G. Kireev*, A. I. Kulebiakina, S. G. Shashkovskiy (Scientific and Industrial Enterprise “Melitta”, Ltd.,
16/10 Mikluho Maklay Str., Moscow, 117997, Russia; e-mail: kireevsg.melitta@gmail.com)

Наиболее распространенной конструкцией шаровых ламп является устройство с двумя электродами, заключенными в кварцевую колбу шаровой формы. Экспериментальные исследования эффективности преобразования запасаемой в конденсаторе электрической энергии в коротковолновое УФ излучение демонстрируют значения, уступающие трубчатым импульсным ксеноновым лампам (в ~2 раза как с использованием коммутаторов, так и без них [7, 8]), что ограничивает их широкое применение. Очевидно, что снижение добротности разрядного контура позволит значительно увеличить эффективность генерации излучения импульсных шаровых ламп. Разработка нового высокоэффективного источника бактерицидного УФ излучения (200—300 нм), обладающего высокими ресурсными характеристиками, позволит расширить область внедрения новой техники.

Настоящая работа посвящена исследованию излучательных характеристик трехэлектродной импульсной ксеноновой лампы и оптимизации энергоэффективных характеристик с целью получения стабильно высокого выхода излучения в полосе излучения, соответствующей бактерицидному действию.

Эксперимент. Для изучения излучательных характеристик короткодуговых разрядов с малоиндуктивным разрядным контуром разработаны трехэлектродные кварцевые лампы. Конструктивно лампа представляет собой сферическую кварцевую оболочку с впаянными в нее электродами: катод изготовлен из спеченого молибденового порошка, легированного скандатом бария для уменьшения работы выхода, анод и поджигной электрод — из вольфрама марки ВТ-5 и ВТ-15. Третий электрод введен сбоку через кварцевую оболочку и расположен по центру межэлектродного промежутка на расстоянии 3 мм от оси лампы.

Исследования проведены с двумя лампами с внешним диаметром кварцевой колбы 30 мм, различающиеся межэлектродным расстоянием (4 и 6 мм) и давлением ксенона (4.0 и 6.5 атм). Оболочка лампы изготовлена из кварца с поглощением в УФ-С области (190—280 нм) ≤15 %.

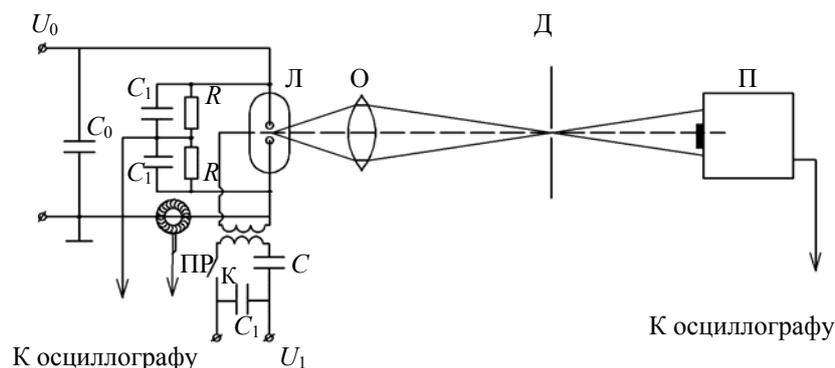


Рис. 1. Схема питания и измерения радиационных характеристик импульсной ксеноновой трехэлектродной лампы: Л — трехэлектродная импульсная короткодуговая ксеноновая лампа; О — кварцевая линза; ПР — пояс Роговского; Д — диафрагма с отверстием 2 мм; C₀ — накопительная емкость; П — спектрально-диагностический комплекс “Спектр”, К — электронный ключ

Емкостной накопитель состоит из двух или четырех параллельно соединенных малоиндуктивных конденсаторов типа К75-48М емкостью 1 мкФ и номинальным напряжением 6 кВ. Суммарная индуктивность разрядного контура 80—90 нГн. Рабочее напряжение на лампах 0.5—2.0 кВ. Иницирование разряда осуществлялось с помощью высоковольтного импульса амплитудой ~30 кВ, подаваемого на поджигной электрод. Энергоэффективные и радиационные характеристики зарегистрированы в режиме одиночных импульсов. Схема питания лампы и измерения радиационных характеристик приведена на рис. 1.

Радиационные характеристики измерены с помощью спектрально-диагностического комплекса “Спектр” [9] вблизи λ = 270, 430, 555, 1000 нм. Разрядный ток и напряжение на электродах лампы измерены смешанным высоковольтным делителем напряжения и поясом Роговского с интегрирующей RC-цепочкой. Сигналы зарегистрированы двухканальным осциллографом TDS-1001.

Яркость сильнооточного разряда измерена следующим образом. На оптической оси входного зрочка “Спектра” устанавливались лампа, кварцевая линза и диафрагма. С помощью диафрагмы по

оси разряда вырезался участок диаметром 2 мм из 10-кратно увеличенного линзой оптического изображения светящегося тела, излучение которого попадало на приемник излучения. С учетом пространственной нестабильности искрового разряда для обработки выбирался максимальный сигнал импульса излучения. Камерой Casio EX-F1 регистрировалась форма тела свечения разряда (600 кадр/с). Для снижения интенсивности световых потоков на матрице камеры использованы два светофильтра ФС-1 и ФС-6.

Результаты и их обсуждение. На рис. 2 представлены характерные осциллограммы тока и падения напряжения на электродах ламп. Видно, что ток имеет колебательный характер. Разрядный ток первой лампы ($pd = 16$) имеет четыре ярко выраженных полупериода, тогда как ток второй лампы ($pd = 39$) — два полупериода. Улучшение согласования контура с нагрузкой объясняется ростом сопротивления канала, связанного с увеличением разрядного промежутка и давления ксенона в лампе. При этом вклад энергии в первый полупериод тока, отвечающий за спектрально-яркостные характеристики разряда и определяемый по соотношению интеграла разрядного тока в первом полупериоде к суммарному интегралу всего разрядного тока, вырос с 43 до 64 %.

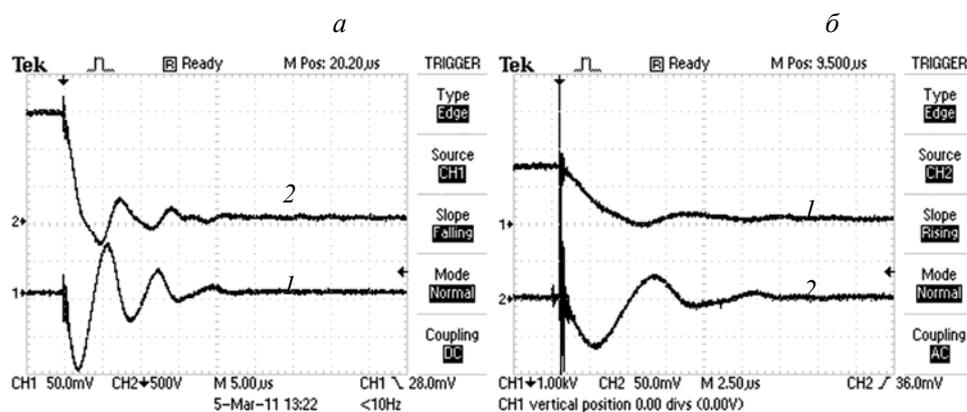


Рис. 2. Осциллограммы тока (1) и напряжения (2) на лампе при $U_0 = 1.5$ кВ, $C_0 = 4$ мкФ; $pd = 16$ (а) и 39 (б)

Время достижения максимума разрядного тока ~ 1.84 и ~ 2.13 мкс для первой и второй ламп (получено из осциллограмм производной тока). В исследуемых режимах максимум тока увеличивается от 800 А при $U_0 = 500$ В до 4400 А при $U_0 = 2$ кВ (при емкости конденсаторной батареи 4 мкФ). При этом пиковая электрическая мощность разряда изменяется в диапазоне 0.23—1.62 МВт. Увеличение напряжения на разрядной емкости с 500 В до 2 кВ приводит к уменьшению времени достижения максимума с ~ 2.42 ($pd = 16$) и ~ 2.84 мкс ($pd = 39$) до ~ 1.82 ($pd = 16$) и ~ 1.85 мкс ($pd = 39$), что вызвано снижением сопротивления разрядного канала.

На рис. 3—5 приведены радиационные характеристики исследуемых трехэлектродных ламп при различных параметрах разрядной цепи. Спектральное распределение плотности энергии излучения при запасаемой в накопительном конденсаторе энергии от 0.5 до 1.125 Дж хорошо описывается в приближении абсолютно черного тела (АЧТ). Увеличение энергии приводит к появлению ярко выраженного максимума в области 250—300 нм, что свидетельствует о высокояркостном характере излучения разряда (рис. 3). Увеличение зарядного напряжения приводит к росту разрядного тока (мощности) и, соответственно, повышению яркостной температуры, но сопровождается снижением сопротивления плазменного канала. Так, при росте энергии разряда в 7.1 раза спектральная плотность энергии излучения увеличивается в 6.2 раза, а интегральная по спектру энергия излучения — менее чем в 5 раз. Интегральный по спектру КПД падает с ~ 43 до ~ 34 %.

При энергии в импульсе 4 Дж ($C_0 = 2$ мкФ, $U_0 = 2$ кВ) и 8 Дж ($C_0 = 4$ мкФ, $U_0 = 2$ кВ) интегральный по спектру КПД ~ 35 и 26.5 % ($pd = 39$ и 16) и ~ 34 % ($pd = 39$) соответственно. Уменьшение энергии в импульсе до 1 Дж ($C_0 = 2$ мкФ, $U_0 = 1$ кВ) и 1.125 Дж ($C_0 = 4$ мкФ, $U_0 = 750$ В) приводит к увеличению интегрального по спектру КПД до ~ 52 %, что можно объяснить ростом омического сопротивления разряда и одновременно смещением максимума спектра излучения в длинноволновую область. Увеличение параметра pd приводит к росту интегрального по спектру КПД излучения с ~ 30 до ~ 38 % при параметрах разрядного контура $C_0 = 4$ мкФ, $U_0 = 1.5$ кВ.

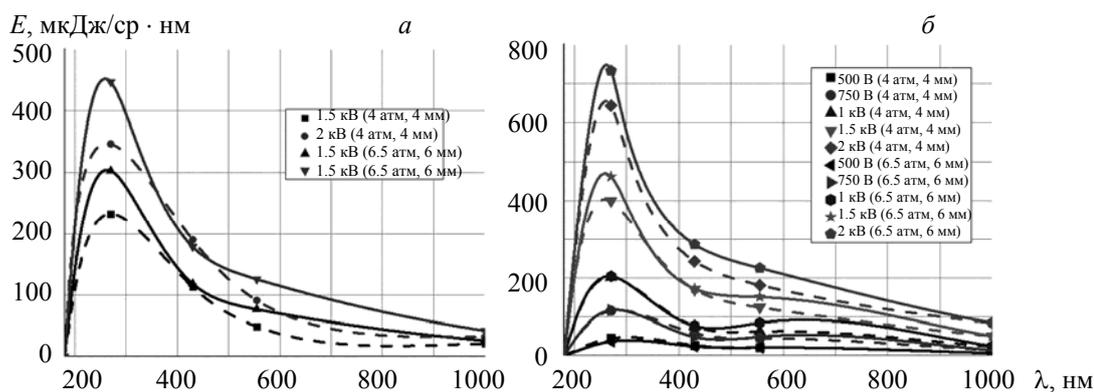


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности энергии излучения от длины волны при варьируемой вкладываемой энергии (точки — экспериментальные данные, соединенные для наглядности сплайном); $C_0 = 2$ (а) и 4 мкФ (б)

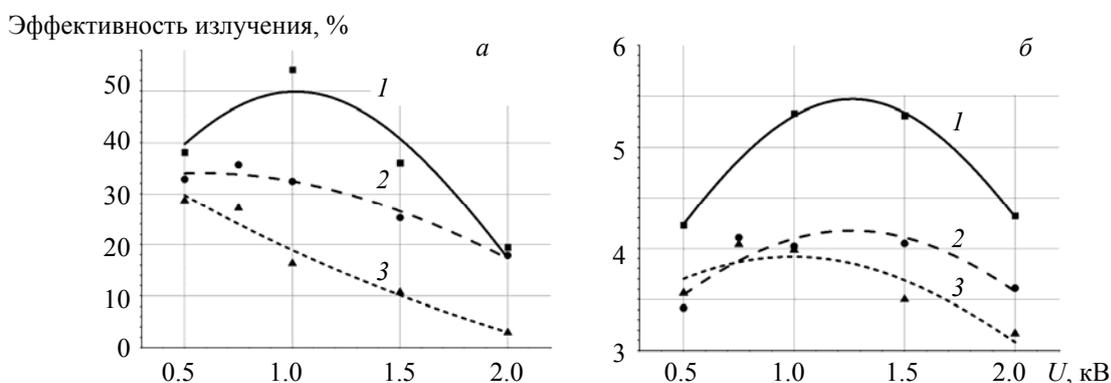


Рис. 4. Зависимость интегральной по спектру эффективности излучения (а) и эффективности излучения в диапазоне $\lambda = 250\text{—}290$ нм (б) от напряжения на конденсаторах: 1 — $p = 6.5$ атм, $d = 6$ мм, $C = 2$ мкФ; 2 — $p = 6.5$ атм, $d = 6$ мм, $C = 4$ мкФ; 3 — $p = 4$ атм, $d = 4$ мм, $C = 4$ мкФ

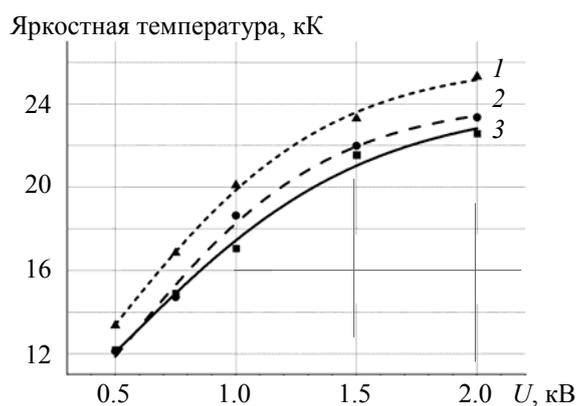


Рис. 5. Зависимость яркостной температуры в диапазоне $\lambda = 250\text{—}290$ нм от напряжения на конденсаторах; 1 — $p = 6.5$ атм, $d = 6$ мм, $C = 2$ мкФ; 2 — $p = 6.5$ атм, $d = 6$ мм, $C = 4$ мкФ; 3 — $p = 4$ атм, $d = 4$ мм, $C = 4$ мкФ

Характер изменения КПД в диапазоне 250—290 нм по сравнению с интегральным КПД при варьировании напряжения заряда накопительной емкости сильно отличается. Так, для всех исследуемых режимов разрядов в лампах максимум выхода излучения в УФ области спектра находится в диа-

пазоне зарядных напряжений 1—1.5 кВ, в то время как общий выход излучения падает с ростом зарядного напряжения. Такое поведение свидетельствует о близости рассматриваемого дугового разряда к приближению АЧТ и возможному появлению эффекта насыщения яркости.

Яркостная температура разряда растет с увеличением плотности мощности [6], однако при достижении 16—20 кК темпы роста яркостной температуры с повышением рабочего напряжения замедляются. Обычно такое насыщение яркости излучения наблюдается для свободно расширяющихся импульсных разрядов в плотных газах [6, 10] и характеризуется зависимостью предельной яркости излучения разряда от атомной массы рабочего газа. Предельно достигаемые яркостные температуры импульсного разряда в ксеноне 28.5—30.0 кК [11], что соотносится с экспериментальными значениями ~25 кК. При таких яркостных температурах максимум излучения в приближении АЧТ приходится на область 110—160 нм, что малоэффективно для бактерицидных ламп ввиду существенного поглощения кварцем излучения с $\lambda < 160$ нм [12] и поглощения излучения молекулярным кислородом на $\lambda = 175—200$ нм [13]. Следовательно, дальнейшее увеличение мощности разряда нецелесообразно.

Приведенные ранее в [14] фотографии разряда показывают, что плазменный канал формируется вблизи поджигного электрода и имеет изогнутую форму, повторяя форму стримера пробоя. С одной стороны, увеличивается длина разрядного канала и фиксируется его положение в пространстве, с другой — электрод поджига подвергается воздействию мощных радиационных потоков, что приводит к его деградации.

Заключение. Трехэлектродная импульсная шаровая ксеноновая лампа является эффективным источником коротковолнового (бактерицидного) УФ излучения. На область спектра, соответствующую бактерицидному действию, приходится не менее 40 % всей излученной энергии, что превышает эффективность импульсных трубчатых ксеноновых ламп почти в два раза. Уровень яркостных температур в указанной области спектра составляет 17 кК, что оптимально для плазменных излучателей сплошного спектра. Экспериментально показана возможность эффективного применения ламп данного класса в качестве источников УФ излучения в бактерицидных устройствах различного назначения. Способность работы на повышенных частотах (сотни герц) [4] предоставляет возможность эффективно использовать короткодуговые импульсные лампы в проточных системах и рециркуляционных установках.

Авторы выражают признательность Г. С. Леонову за обсуждение и ценные дополнения к работе.

- [1] Справочная книга по светотехнике, под ред. Ю. Б. Айзенберга, Москва, Энергоатомиздат (1983)
- [2] А. С. Камруков, Н. П. Козлов, М. С. Яловик. Безопасность жизнедеятельности, **1** (2003) 32—40
- [3] С. В. Гавриш. Светотехника, **1** (2009) 27—31
- [4] Т. А. Калинин, Н. А. Поликарпов, Я. А. Гольдштейн, И. В. Гончаренко. Поликлиника, **3** (2009) 113—117
- [5] S. Simmons, M. Morgan, T. Hopkins, K. Helsabeck, J. Stachowiak, M. Stibich. J. Infect. Prevent., **14**, N 5 (2013) 172—174
- [6] Импульсные источники света, под ред. И. С. Маршака, Москва, Энергия (1978)
- [7] Д. В. Рыбка, Е. Х. Бакшт, М. И. Ломаев, В. Ф. Тарасенко, М. Кришнан, Дж. Томпсон. ЖТФ, **75**, № 2 (2005) 131—134
- [8] А. С. Камруков, А. И. Кулебякина. Материалы VIII междунар. симпоз. по радиационной плазмодинамике: Сб. науч. тр., Москва, изд. НИЦ “Инженер” (2009) 137—142
- [9] В. П. Архипов, С. Г. Архипов, М. Н. Жарников, А. С. Камруков, А. В. Плюснин, К. А. Семенов, Я. Я. Хаджиева, М. С. Яловик. Материалы VI междунар. симпоз. по радиационной плазмодинамике: Сб. науч. тр., Москва, изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана (2003) 202—203
- [10] М. П. Ванюков, А. А. Мак. УФН, LXVI, № 2 (1958) 301—329
- [11] У. Юсупалиев. Краткие сообщ. по физике, **1** (2011) 32—40
- [12] Ю. П. Андреев, Р. В. Браиловская, Н. А. Воскресенская. Физико-технические свойства кварцевых стекол для оболочек источников высокоинтенсивного света, Москва, ЦНИИ “Электроника” (1976)
- [13] С. П. Перов, А. Х. Хргиан. Современные проблемы атмосферного озона, Ленинград, Гидрометеоиздат (1980)
- [14] А. С. Камруков, С. Г. Киреев, Н. П. Козлов, С. Г. Шашковский. Журн. прикл. спектр., **84**, № 4 (2017) 656—663 [A. S. Kamrukov, S. G. Kireev, N. P. Kozlov, S. G. Shashkovskii. J. Appl. Spectr., **84** (2017) 657—663]