

Импульсная лампа с ограничивающей разряд системой из кварцевой и сапфировой оболочек

К. А. Тумашевич, С. Г. Киреев, С. Г. Шашковский, Д. Ю. Пугачев

Приведена конструкция импульсного газоразрядного источника УФ-излучения с двумя оболочками, в котором сапфировая трубка размещена в разрядной части кварцевой лампы с фольговыми тоководами. Такое конструктивное решение позволяет повысить устойчивость разрядной оболочки к термическому воздействию импульсного дугового разряда. Проведены исследования электротехнических и радиационных параметров импульсной лампы в разрядном контуре с емкостью 40 мкФ и напряжением заряда конденсатора 2,42 кВ. Максимум плотности тока достигается за 31 мкс и составляет 10 кА/см². Импульсная электрическая мощность в лампе составила 2,8 МВт, что позволило достичь яркостной температуры 11 кК в спектральном диапазоне 237–267 нм. Измеренная энергия излучения в диапазоне 200–300 нм составляет 26 % от всей излученной энергии.

Ключевые слова: импульсная лампа, ксенон, трубчатая лампа, сапфир, кварц, ультрафиолет, обеззараживание, яркостная температура, дуговой разряд.

Ссылка: Тумашевич К. А., Киреев С. Г., Шашковский С. Г., Пугачев Д. Ю. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 6. С. 608.

Reference: K. A. Tumashevich, S. G. Kireev, S. G. Shashkovskiy, and D. U. Pugachev, Usp. Prikl. Fiz. 7 (6), 608 (2019).

Введение

В настоящее время с целью обеспечения безопасности жизнедеятельности человека все большее значение приобретают УФ-технологии с использованием источников излучения для прямых интенсивных фотохимических процессов при обработке воды и воздуха от трудно окисляемых органических соединений

[1], для формирования радикалов с высоким окислительным потенциалом в АОП-технологиях (Advanced oxidation processes) [2], обеззараживания оптически плотных жидких пищевых продуктов [3–5]. Потенциальная экологическая опасность широко используемых ртутных ламп низкого давления подтолкнула развитие установок на основе импульсных газоразрядных ламп (ИГЛ) для обеспечения микробиологической чистоты в медицинских учреждениях как в Российской Федерации [6], так и в США [7].

Получающие все более широкое распространение ИГЛ конструктивно представляют собой разрядную трубку из кварцевого стекла с герметично впаянными в нее электродными узлами и заполненную инертным газом, чаще всего ксеноном. При приложении высокого напряжения между электродами инициируется импульсный дуговой разряд, характеризующийся высокой интенсивностью излучения и полихроматическим характером спектрально-

Тумашевич Константин Александрович, инженер-исследователь.

Киреев Сергей Геннадьевич, нач. лаб.

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

Пугачев Дмитрий Юрьевич, зам. нач. лаб.

ООО «НПП «Мелитта».

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

Тел. +7(495) 729-3534. E-mail:

kireevsg.melitta@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23 октября 2019 г.

© Тумашевич К. А., Киреев С. Г., Шашковский С. Г., Пугачев Д. Ю., 2019

го распределения в диапазоне длин волн 200–1100 нм [8].

Однако разогрев плазмы до оптимальных с точки зрения генерации УФ-излучения яркостных температур, осуществляемый за счет увеличения скорости энерговыклада в ксеноновый разряд, неизбежно сопровождается мощными ударными нагрузками на кварцевую стенку импульсной лампы и резкой интенсификацией плазменно-химических процессов на внутренней поверхности стенки, что приводит к значительному снижению ресурсных характеристик лампы.

Альтернативным решением для традиционной трубки из кварцевого стекла является использование монокристаллической сапфировой оболочки лампы, пропускающей излучение в спектральном диапазоне от 0,2 до 6 мкм, а также обладающей высокой термической и химической стойкостью к воздействию агрессивных сред вплоть до 1500 °С [9]. Однако анизотропность тепловых свойств сапфира и сложность подбора материала с близким к сапфиру коэффициентом термического расширения позволяют изготавливать импульсные лампы только пайкой колпачковых токовыводов припоями, обеспечивающими рабочую температуру электродных узлов в диапазоне 500–700 °С. Такое температурное ограничение не позволяет использовать лампы при высоких мощностных нагрузках либо требует прину-

дительного охлаждения токовыводов. Кроме того, низкотемпературный спай не позволяет провести технологический отжиг при температуре около 1000 °С, который способствует очистке поверхности оболочки и электродов от молекулярных газов и позволяет сильно поднять ресурсные характеристики ИГЛ в целом [10].

Данная публикация посвящена рассмотрению впервые разработанной конструкции ИГЛ с ксеноновым разрядом, ограниченной системой из сапфировой и кварцевой оболочек, и изучению её электротехнических и радиационных параметров.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являлся экспериментальный образец кварцево-сапфировой лампы, показанный на рис. 1. Конструктивно лампа представляет собой кварцевую оболочку 2 с размещенной в газоразрядной части сапфировой трубкой 1 с внутренним диаметром 5 мм. Электродные узлы выполнены по технологии фольговых токовыводов и включают в себя электрод 3, кварцевый вкладыш 4 и электродный вывод 5. Такое решение позволило исключить возможность контакта плазменного канала с кварцевой стенкой ИГЛ. Длина межэлектродного промежутка составила 110 мм.

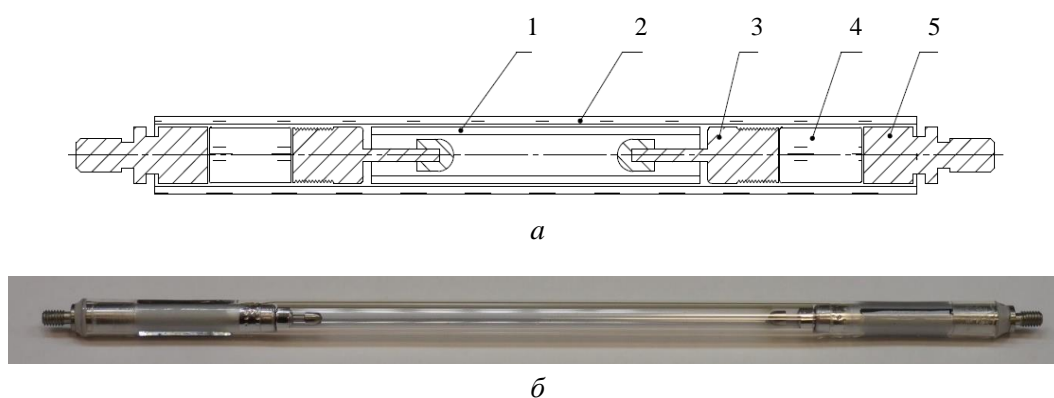


Рис. 1. Принципиальная схема конструкции (а) и внешний вид (б) кварцево-сапфировой лампы.

Для экспериментальных исследований электрических и радиационных характеристик лампы был разработан и изготовлен стенд, принципиальная схема которого показана на рис. 2. Емкость рабочего конденсатора состав-

ляла 40 мкФ при напряжении заряда 2,42 кВ. Инициирование разряда осуществлялось с помощью высоковольтного импульса амплитудой ≈ 24 кВ. Паразитное сопротивление контура составляло ≈ 30 мОм. Измеренная индуктивность

контура без насыщающегося магнитного сердечника катушки поджига имеет величину ≈ 13 мкГн.

Разрядный ток регистрировался с помощью калиброванного коаксиального безындуктивного токового шунта SDN-001 с минимальным временем нарастания сигнала 30 нс и активным сопротивлением 1,012 мОм, что на 3 порядка ниже типового сопротивления плазменного канала трубчатых ламп. Шунт располагался между конденсатором и поджигаемым трансформатором, что позволило исключить влияние высоковольтного импульса инициализации разряда на осциллограмму разрядного тока.

Изменение 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 ~ 2 нс. Первый делитель напряжения устанавливался между обкладками конденсатора, второй и третий сигнальными выводами крепились к электродам лампы, а земляными – к минусовой обкладке конденсатора. Полученные вре-

менные зависимости падения напряжения со второго и третьего делителей напряжения вычитались друг из друга, в результате чего была получена временная характеристика падения напряжения на лампе.

Объединенные в одной точке земляными выводами шунт и делители напряжения позволили проводить одновременную регистрацию импульса тока и падения напряжения на четырехканальном осциллографе TDS2024C. Обработка полученных массивов данных заключалась в вычислении импульсных мощностей, вкладываемых в контур и лампу, путем перемножения соответствующих осциллограмм тока и напряжения и вычисления электрической энергии в контуре и лампе, полученной за счет интегрирования мощности.

Энергия излучения в полном диапазоне контролировалась при помощи калиброванного чернотельного приемника излучения Ophir PE50BB-DIF (Ophir Optronics Solutions), обладающего практически постоянной спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 0,2 до 20 мкм.

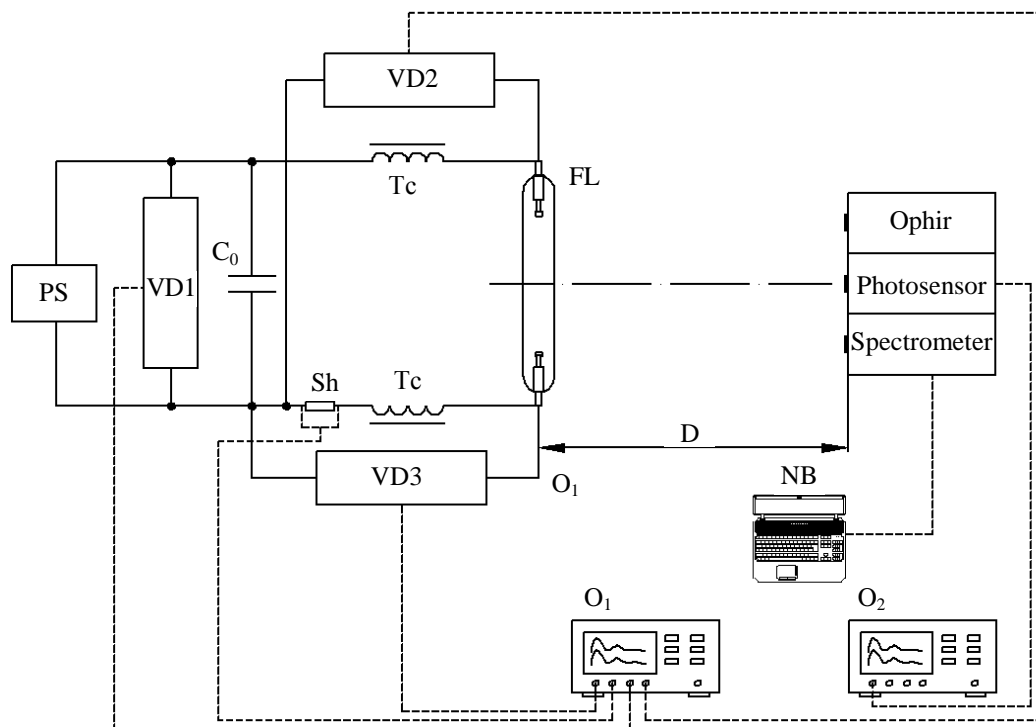


Рис. 2. Принципиальная схема измерительного стенда: PS – зарядный блок, VD1, VD2, VD3 – делители напряжения, C0 – разрядный конденсатор, Sh – безындуктивный шунт, Tc – катушка поджига, FL – импульсная газоразрядная лампа, O1, O2 – осциллографы, NB – ноутбук.

Спектр излучения в УФ-области регистрировался с применением методики [11] при помощи калиброванного фотодиодного приемника (ФД) излучения SGLux SG01D-C18 со временем нарастания сигнала ≈ 15 нс и оптоволоконного спектрометра просветленного типа с высокой чувствительностью в УФ-диапазоне AvaSpec-ULS2048-USB2.

Полученные результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены измеренные и рассчитанные электротехнические характеристики лампы и разрядного контура. Ток I имеет апериодический характер с близкой к критической форме затухания [12] и достигает своего максимума ($\approx 2,17$ кА) за время ≈ 31 мкс. Отличие во временном характере падения напряжений на лампе $U_{\text{л}}$ и конденсаторе $U_{\text{к}}$ связано с высоким значением паразитной индуктивности контура, причем преимущественно за счет тороидальной поджигной катушки. К моменту времени на 29-й мкс электрическая мощность в лампе $P_{\text{л}}$ достигает своего максимального значения $\approx 2,8$ МВт. При этом в разряд вкладывается около 44 Дж, что составляет $\approx 38\%$ от всей вложенной в разряд энергии. Сопротивление плазменного шнура R в момент максимума мощности составляет ≈ 590 мОм и падает до ≈ 560 мОм к моменту времени 38 мкс. Запасенная в конденсаторе энергия вкладывается в разряд $E_{\text{л}}$ с эффективностью 91 %, что свидетельствует о невысоком паразитном сопротивлении контура и о его хорошем согласовании с нагрузкой.

Оценка яркостной температуры лампы в приближении абсолютно черного тела в спектральном диапазоне регистрации ФД (237–267 нм) показала значение ≈ 11 кК. Максимум спектрального распределения АЧТ с учетом спектрального пропускания кварцевой колбы при такой температуре должен приходиться на длину волны 263 нм, что совпадает с локальным максимумом спектра действия микроорганизмов [13, 14].

На рис. 4 представлено спектральное распределение энергии излучения исследованной ИГЛ. Интегрирование по наиболее актуальному в сфере обеззараживания спектральному диапазону 200–300 нм дает 17,9 Дж, что составляет $\approx 16,8\%$ от вложенной в разряд энер-

гии и около 15 % – от запасенной. Отсутствие ярко выраженного максимума на длине волны 263 нм связано с непостоянством спектрального коэффициента поглощения [15, 16] плазмы и интегральным характером спектра за все время импульса.

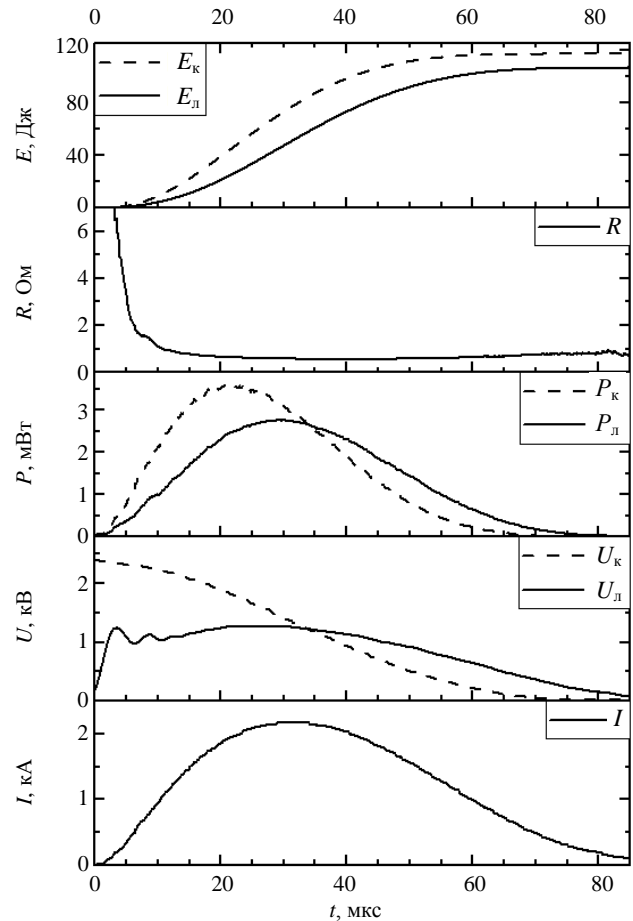


Рис. 3. Электротехнические параметры лампы и контура: подстрочный инициал «к» указывает на параметр в контуре, «л» – в лампе.

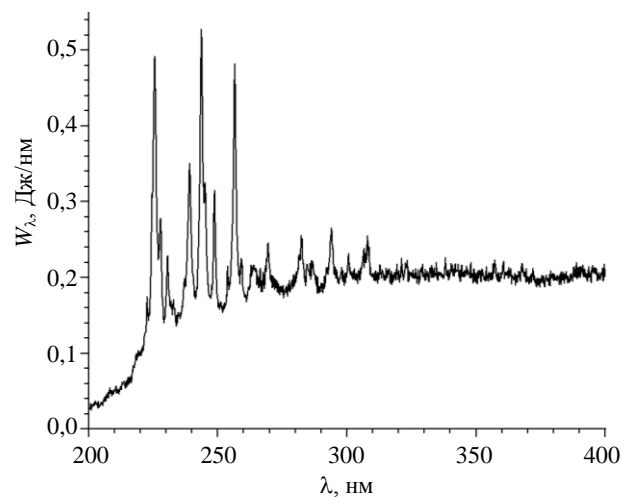


Рис. 4. Энергетический спектр излучения кварцево-сапфировой ИГЛ.

Измеренная пироэлектрическим приемником энергия излучения во всем спектральном диапазоне составляет 68 Дж или $\approx 58\%$ от запасенной в конденсаторе энергии.

Заключение

В работе представлены результаты исследования разработанной импульсной газоразрядной ксеноновой лампы с двойной оболочкой. На примере лампы с диаметром разрядного промежутка 5 мм и межэлектродным расстоянием 110 мм получены электротехнические и спектрально-энергетические характеристики разряда.

Полученное значение плотности тока 11 кА/см^2 позволило разогреть плазму до яркостной температуры 11 кК. Радиационные измерения показали, что на бактерицидный диапазон спектра (200–300 нм) приходится 26 %, а на всю УФ-область – 56 % от всей излученной энергии.

Использование сапфировой оболочки в качестве химически и термически устойчивого к воздействию высокоинтенсивных излучательных и тепловых потоков от импульсного дугового разряда (но в то же время прозрачного в УФ-области материала) потенциально должно позволить увеличить ресурсные характеристики импульсной газоразрядной лампы, что будет проверено в ходе дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Blystone P. G., Johnson M. D., Haag W. R. Daley P. F. / Proc. Emerging Technologies in Hazardous Waste Management III – Washington. 1993. P. 380.
2. Parsons S. Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – London: IWA Publishing, 2004.
3. Gomez-Lopez V. M., Ragaert P., Debevere J., Devlieghere F. // Trends food sci tech. 2007. Vol. 18. P. 464.
4. Daina L. R., Carmen I. M. // J FOOD ENG. 2013. Vol. 114. P. 331.
5. Pataro G., Muñoz A., Palgan I., Noci F., Ferrari G., Lyng J. G. // Food Research International. 2011. Vol. 44. P. 1642.
6. Шестопалов Н. В., Акимкин В. Г., Федорова Л. С., Скопин А. Ю., Гольдштейн Я. А., Голубцов А. А., Киреев С. Г., Поликарпов Н. А., Шашковский С. Г. // Мед-Алфавит. 2017. Т. 2. № 18. С. 5.
7. Sampathkumar P., Folkert C., Barth J. E., Nation L., Benz M., Hesse A., Mielke C. L., Zaveleta K. W. // АИС. 2019. Vol. 47. P. 406.
8. Маршак И. С. Импульсные источники света. – М.: Энергия. 1978.
9. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 42.
10. Симакин А. Г. Оптимизация и создание газоразрядных приборов оптического излучения повышенной надежности для применения в электронных устройствах: дис. канд. тех. наук. Владикавказ. 2010.
11. Киреев С. Г., Архипов В. П., Шашковский С. Г., Козлов Н. П. // Фотоника. 2017. Т. 6. № 8. С. 48.
12. Камруков А. С., Кулебякина А. И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп. – М.: ООО НИЦ «Инженер». 2010.
13. Kowalski W. Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. UVGI for Air and Surface Disinfection. – NY: Springer, 2009.
14. Beck S. E., Wright H. B., Hargy T. M., Larson T. C., Linden K. G. // Water Res. 2015. Vol. 70. P. 27.
15. Филиппов М. В., Коробков С. С., Градов В. М., Желаяев И. А. // Математика и математическое моделирование. 2017. № 6. С. 54.
16. Басов Ю. Г. // Электронная техника. Серия 4: Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1985. Т. 3. № 108. С. 24.

PACS 52.80.Yr

Flash lamp with a discharge limiting by the system of quartz and sapphire envelopes

K. A. Tumashevich, S. G. Kireev, S. G. Shashkovskiy, and D. U. Pugachev

Scientific and Industrial Enterprise "Melitta", Ltd
16/10 Mikluho-Maklaya st., Moscow, 117977, Russia

Received October 23, 2019

Consideration is given to the design of a flash lamp with a double envelope. The lamp has the sapphire tube, which placed in the discharge part, and the gas-tight seal made by ribbon

technology. The solution allows to carry out technological annealing of a lamp and to preserve less thermally and chemically stable quartz from arc discharge. The electrical and radiation parameters of a flash lamp in a discharge circuit with a capacity of 40 μF and a voltage of 2.42 kV were studied. The peak value of the current density of 10 kA/cm² was reached in 31 μs . The pulsed electric power in the lamp was 2.8 MW, which allows to achieve a brightness temperature of 11 kK in the spectral range of 237–267 nm. The measured radiation energy in the range of 200–300 nm accounted for 26 % of the total emitted energy.

Keywords: flash lamp, xenon, tubular lamp, sapphire, quartz, ultraviolet, disinfection, brightness temperature, arc discharge.

REFERENCES

1. P. G. Blystone, M. D. Johnson, W. R. Haag, and P. F. Daley, in *Proc. Emerging Technologies in Hazardous Waste Management III* (Washington. 1993). P. 380.
2. S. Parsons, *Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment* (London, IWA Publishing, 2004).
3. V. M. Gomez-Lopez, P. Ragaert, J. Debevere, and F. Devlieghere, *Trends food sci. tech.* **18**, 464 (2007).
4. L. R. Daina and I. M. Carmen, *J FOOD ENG.* **114**, 331 (2013).
5. G. Pataro, A. Muñoz, I. Palgan, F. Noci, G. Ferrari, and J. G. Lyng, *Food Research International.* **44**, 1642 (2011).
6. N. V. Shestopalov, V. G. Akimkin, L. S. Federova, A. U. Skopin, Ya. A. Goldshteyn, A. A. Golubtsov, S. G. Kireev, N. A. Polikarpov, and S. G. Shashkovskiy, *Med-Alphabet* **2** (18), 5 (2017)
7. P. Sampathkumar, C. Folkert, J. E. Barth, L. Nation, M. Benz, A. Hesse, C. L. Mielke, and K. W. Zaveleta, *AJIC.* **47**, 406 (2019).
8. I. S. Marshak, *Pulsed light sources*, (Springer US, New York, 1984; Energia, Moscow, 1978).
9. S. V. Gavrish, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 42 (2011).
10. A. G. Simakin, *Optimization and design of gas-discharge optical radiation devices of enhanced reliability for use in electronic devices* (PHD work, Vladikavkaz, 2010) [in Russian].
11. S. G. Kireev, V. P. Arkhipov, S. G. Shashkovsky, and N. P. Kozlov, *Photonics* **6** (68), 48 (2017).
12. A. S. Kamrukov and A. I. Kulebyakina, *Techniques for xenon flash lamp calculating*. (Moscow, Engineer, Ltd., 2010) [in Russian].
13. W. Kowalski, *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook. UVGI for Air and Surface Disinfection* (NY, Springer. 2009).
14. S. E. Beck, H. B. Wright, T. M. Hargy, T. C. Larson, and K. G. Linden, *Water Res.* **70**, 27 (2015).
15. M. V. Filippov, S. S. Korobkov, V. M. Gradov, and I. A. Zhelayev, *Matematika and Matematikal Modelirovanie*, No. 6, 54 (2017) .
16. U. G. Basov, *Electronnaya Tekhnika. Seriya 4: Electroвакуумные I газоразрядные приборы.* **3** (108), 24 (1985).