

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА

УДК 537.525

КОМПАКТНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ЭКСИЛАМПЫ  
С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 126 НМ

© 2024 г. В. С. Скакун<sup>а</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>а,\*</sup>, В. А. Панарин<sup>а</sup>, Д. А. Сорокин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

\*e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.

После доработки 27.07.2023 г.

Принята к публикации 12.10.2023 г.

Разработан компактный излучатель сравнительно простой конструкции с аргоновым наполнением, который может быть использован для создания эксиламп излучения в вакуумной ультрафиолетовой и ультрафиолетовой областях спектра. Исследованы его характеристики. Для увеличения мощности излучения на втором континууме димеров аргона ( $\lambda \approx 126$  нм) применена прокачка газа через область разряда. При частоте следования импульсов возбуждения 96 кГц за выходным окном из  $\text{MgF}_2$  получена плотность мощности излучения при длине волны  $\lambda \approx 126$  нм более 5 мВт/см<sup>2</sup>. Показано, что прокачка аргона со скоростью 0.5–1 л/с через разрядную область позволяет стабилизировать среднюю мощность вакуумного ультрафиолетового излучения (отклонения не превышали 2%).

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Источники спонтанного излучения, в том числе эксилампы [1, 2], широко используются в различных областях науки и техники и продолжают совершенствоваться. Особое внимание уделяется источникам, которые предназначены для получения излучения в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра. Весьма часто источниками излучения в ВУФ-области спектра служат вторые континуумы димеров ксенона (172 нм), криптона (146 нм) и аргона (126 нм).

Для создания газоразрядных источников спонтанного излучения с длиной волны 126 нм используют различные конструкции излучателей. Так, существуют устройства, в которых аргон возбуждается барьерным разрядом, формируемым между покрытыми диэлектриком электродами [3–5]. Такие устройства могут применяться для облучения различных материалов, например, с целью получения люминесценции или создания фотодефектов. В этом случае источники излучения и облучаемые образцы помещаются в специальные камеры большого

размера, которые заполнены аргоном при атмосферном давлении. Выходные окна в источниках такого типа не применяются, а аргон при медленной непрерывной прокачке циркулирует между камерой и системой очистки, в которой удаляются примеси других газов, появляющиеся при воздействии плазмы разряда и ВУФ-излучения на электроды, стенки и образцы.

Также применяются компактные газоразрядные источники, работающие на длине волны примерно 126 нм, с диаметром выходного пучка около 1 см, в которых ВУФ-излучение выводится через специальное выходное окно [6–8], которое крепится на торце колбы излучателя. При низких давлениях аргона такие источники обычно излучают в ВУФ-области спектра на линиях и полосах в области 110–135 нм [6], а при высоких – на полосе второго континуума димера аргона с максимумом на длине волны 126 нм [7, 8]. В компактных источниках ВУФ-излучения материалом для выходных окон служат кристаллы  $MgF_2$ , или  $CaF_2$ , или  $LiF$ , прозрачные для излучения на длине волны примерно 126 нм. Окна в этом случае герметизируются с помощью прокладки или приклеиваются к колбе посредством специального клея. Ввиду различия в коэффициентах расширения окна из указанных материалов не могут быть приварены к колбе из кварца и других материалов. Во время работы источника излучения или процедуры его дегазации температура колбы повышается, что приводит к растрескиванию приклеенного кристалла. Источник излучения, работающий при малой мощности возбуждения непрерывного разряда в аргоне низкого давления, описан в статье [6]. Отпаянные образцы излучателей с приклеенными окнами могут быть реализованы и при импульсно-периодическом возбуждении, но только с малой плотностью мощности излучения  $W$ .

В работах [7, 8] было показано, что в компактных источниках излучения с длиной волны примерно 126 нм плотность мощности излучения может быть увеличена посредством заполнения колбы излучателя аргоном при давлении выше атмосферного и последующего его вытеснения за пределы колбы – в окружающий воздух. Однако полученные при этом значения плотности мощности ВУФ-излучения были малыми (менее  $0.1 \text{ мВт/см}^2$ ).

Целью данной работы являлось создание компактного излучателя для эксилампы на димерах аргона с плотностью мощности излучения на длине волны примерно 126 нм не менее  $5 \text{ мВт/см}^2$ , обеспечивающего за выходным окном из  $MgF_2$  облучение образцов в различных агрегатных состояниях.

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ

Разработанный компактный излучатель с прокачкой аргона через разрядную область, состоящий из колбы, изготовленной из двух кварцевых трубок, с размещенным на ее правом

Рис. 1

торце плоским окном из  $MgF_2$  показан на рис. 1.

Внешние диаметры трубок 4 и 10 составляли соответственно 21 и 9 мм, а длина трубки большого диаметра была равна 100 мм. Излучатель эксилампы возбуждается барьерным разрядом и функционирует следующим образом. Вначале включается прокачка аргоном колбы излучателя со скоростью 0.5–1 л/мин. Поток аргона, показанный стрелкой 1, подается через трубку 10 в область 8 между вершинами конусообразных углублений 5, отражается от внутренней поверхности выходного окна, обтекает на обратном пути углубления 5 и заполняет объем 9 между трубками 4 и 10. Выходящий из колбы в окружающую атмосферу поток сначала воздуха, а затем аргона (стрелка 2 на рис. 1) движется через отверстие 3 в левом торце трубки 10. После вытеснения воздуха из колбы, для чего достаточно одной минуты при диаметре отверстия 3 около 1 мм, включается импульсно-периодический источник напряжения. Источник подключается к электродам 6 и формирует последовательность импульсов положительной и отрицательной полярности. Амплитуда импульсов напряжения  $|U|$  может варьироваться в пределах от 5 до 6.5 кВ при времени нарастания и длительности на полувывсоте 0.3 и 1.5 мкс соответственно. Частота следования импульсов напряжения  $f$  могла изменяться от 5 до 96 кГц. Импульсы напряжения с указанными параметрами обеспечивали пробой аргона в области 8 между вершинами конусообразных углублений, имеющих угол при вершине  $\varphi \approx 60^\circ$ . При этом формировалась диффузная плазма барьерного разряда, излучающая на длине волны примерно 126 нм.

Поскольку правый торец трубки малого диаметра 10 установлен вплотную к внешней поверхности конусообразных углублений 5, электрическое поле в прилегающих областях увеличивалось. Это приводило к зажиганию коронного разряда, излучение которого облегчало пробой заполненного аргоном межэлектродного промежутка 8. Размеры разрядной плазмы в области 8 зависели от амплитуды и частоты следования импульсов напряжения, давления аргона и скорости его прокачки. В созданном источнике излучения диффузная форма разряда при межэлектродном зазоре 3 мм (между вершинами конусообразных углублений) сохраняется до давления аргона 1.4 атм. Теплоотвод от колбы излучателя обеспечивался как потоком аргона, так и окружающим воздухом.

Для измерения средней плотности мощности излучения использовался измеритель С8026 с головкой Н8025-126 (Hamamatsu Corp.). Площадь приемной части измерительной головки прибора составляет 0.87 см<sup>2</sup>. Данные на компьютер с измерителя мощности Hamamatsu С8026 передавались через СОМ-порт. При этом каждой из приводимых ниже на графике точке соответствовало среднее значение за 16 импульсов. Стандартное отклонение рассчитывалось на основе не менее 5 измерений. Спектр излучения в ВУФ-области записывался монохроматором VM-502 (Acton Researcher Corp.). Напряжение между электродами измерялось делителем АСА-6039 (АКТАКОМ), а ток разряда определялся с помощью шунта, имеющего

сопротивление 50 Ом. Электрические сигналы регистрировались осциллографом Tektronix TDS-3034 (0.3 ГГц, 2.5 выборки/нс).

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тестирование компактного излучателя проводилось при использовании аргона высокой чистоты (содержание примесей не превышало 0.001%), который промышленно производится в больших объемах и имеет по сравнению с другими инертными газами, которые используются в эксилампах, сравнительно низкую стоимость. Эмиссионный спектр излучения плазмы барьерного разряда в диапазоне 110–140 нм, формируемой между конусообразными углублениями, оснащенными электродами, приведен на рис. 2.

Рис. 2

Зарегистрированная полоса излучения имеет типичную для вторых континуумов димеров аргона форму [1–5, 7, 8]. При уменьшении скорости прокачки аргона до 0.5 л/мин форма спектральной полосы не изменялась. На рис. 2 видно, что в основной полосе димера аргона отсутствуют какие-либо артефакты в виде линий и полос примесных элементов, что свидетельствует о высокой чистоте исходного рабочего газа и демонстрирует эффективность его прокачки в колбе. Время однократного включения излучателя превышало 60 мин. Изменения средней мощности излучения при этом не фиксировались.

Зависимости плотности мощности излучения димеров аргона в центре выходного пучка, регистрируемого через окно размером  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, от частоты следования импульсов представлены на рис. 3.

Рис. 3

Изменение давления аргона на входе в колбу излучателя, а также диаметра отверстия 3 (см. рис. 1) позволяло регулировать скорость прокачки газа. При уменьшении скорости прокачки до 0.5 л/мин и частоты следования импульсов до единиц кГц плотность мощности излучения снижалась, но источник излучения при напряжении на межэлектродном зазоре 5.8–6.5 кВ продолжал стабильно работать. Увеличение напряжения в указанных пределах приводило к линейному росту средней мощности излучения. При  $|U| = 6.5$  кВ, скорости прокачки 1 л/мин и  $f = 96$  кГц плотность мощности излучения составляла 6.2 мВт/см<sup>2</sup>. Стабильность средней мощности излучения при этом была не хуже 2%.

Испытания излучателя с прокачкой криптона, максимум длины волны излучения которого приходится на 146 нм, не проводились из-за высокой цены на данный сорт газа. Испытания излучателя в режиме заполнения ксеноном проводились в варианте отпаянной колбы. Внутренняя кварцевая трубка при этом извлекалась, а левый торец герметизировался. К правому торцу приваривалось окно из кварцевой пластинки марки GE-021 толщиной 2.18 мм. Излучатель в этом случае сначала откачивался до глубокого вакуума при одновременном

нагреве в муфельной печи, а затем заполнялся чистым ксеноном. Плотность мощности излучения при  $f = 96$  кГц и  $|U| = 5.8$  кВ составила  $45$  мВт/см<sup>2</sup>.

#### 4. ВЫВОДЫ

Создан компактный излучатель для эксилампы на димерах аргона с возбуждением барьерным разрядом, излучение которого может быть выведено в различные газовые среды и вакуум за счет окна из MgF<sub>2</sub>. Стабильная работа излучателя в течение длительного времени обеспечивается прокачкой аргона через колбу со скоростью 0.5–1 л/мин, т.е. частой сменой рабочего газа в области разряда. Это позволяет улучшить охлаждение излучателя и способствует удалению из рабочего объема примесей других газов, которые нарабатываются в колбе за счет воздействия разрядной плазмы и ВУФ-излучения на стенки излучателя и выходное окно.

Отметим, что данный излучатель с приваренным окном из кварца и без внутренней трубки может быть изготовлен в виде отпаянного образца с большим сроком службы для эксиламп, максимальное значение длины волны излучения которых составляет 172, 207, 222, 283 и 308 нм.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Д.С. Печеницина за создание источника питания для излучателя и А.Н. Панченко за помощь при регистрации спектров излучения в ВУФ-области.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данное исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

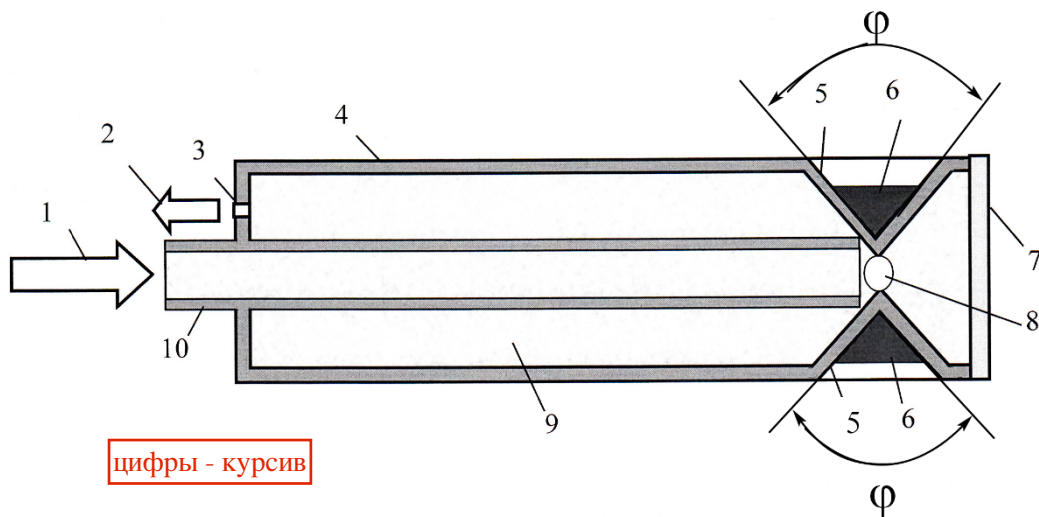
1. *Boyd I.W., Zhang J.-Y., Kogelschatz U.* In: Photo-Excited processes, Diagnostics and Applications. Boston: Springer, 2003, p. 161. [https://doi.org/10.1007/1-4020-2610-2\\_6](https://doi.org/10.1007/1-4020-2610-2_6)
2. *Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Lomaev M.I.* UV and VUV excilamps. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. ISBN 978-3-695-21756-2
3. *Sobottka A., Drößler L., Lenk M., Prager L., Buchmeiser M. R.* // Plasma Processes and Polymers. 2010. V. 7. P. 650. <http://doi.org/10.1002/ppap.200900145>
4. *Elsner C, Lenk M, Prager L, Mehnert R.* // Appl. Surf. Sci. 2006. V. 252. P. 3616. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.05.071>
5. *Ломаев М.И., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Лисенко А.А.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. С. 74.
6. *Будович В.Л., Дубакин А.Д., Крылов Б.Е., Полотнюк Е.Б.* // ПТЭ. 2018. №1. С. 123.
7. *Ерофеев М.В., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В.* // ПТЭ. 2012. №4. С. 70.
8. *Baricholo P., Hlatkywayo D.J., Collier M., Von Bergmann H.M., Stehmann T., Rohwer E.* // South African J. Science. 2011. V. 107. № 11. P. 1. <http://doi.org/10.4102/sajs.v107i11/12.581>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

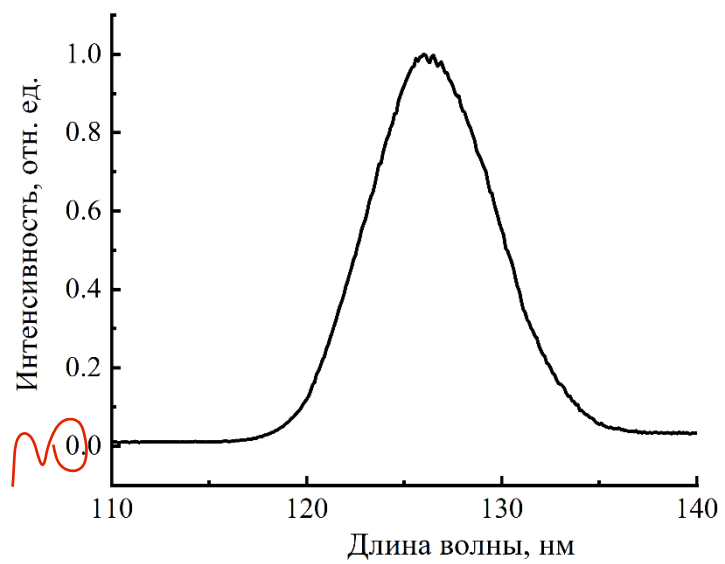
**Рис. 1.** Конструкция компактного излучателя: *1* – входной поток аргона, направленный в колбу излучателя, *2* – выходной поток аргона из колбы в окружающий воздух, *3* – отверстие в левом торце колбы, *4* – кварцевая трубка большего диаметра, *5* – часть трубки *4*, имеющая форму конуса с закругленной вершиной, *6* – электроды, *7* – выходное окно из  $\text{MgF}_2$ , *8* – область разряда, *9* – внутренняя часть камеры, заполняемая аргоном, *10* – трубка малого диаметра.

**Рис. 2.** Спектр излучения компактного излучателя эксилампы на димерах аргона при скорости прокачки 1 л/мин и частоте следования импульсов 96 кГц.

**Рис. 3.** Зависимости средней плотности мощности излучения димеров аргона на длине волны около 126 нм от частоты следования импульсов напряжения, полярность которых чередовалась. Скорость прокачки аргона 1 л/мин (*1*) и 0.5 л/мин (*2*),  $|U| = 6.2$  кВ.



**Рис. 1**



**Рис. 2**

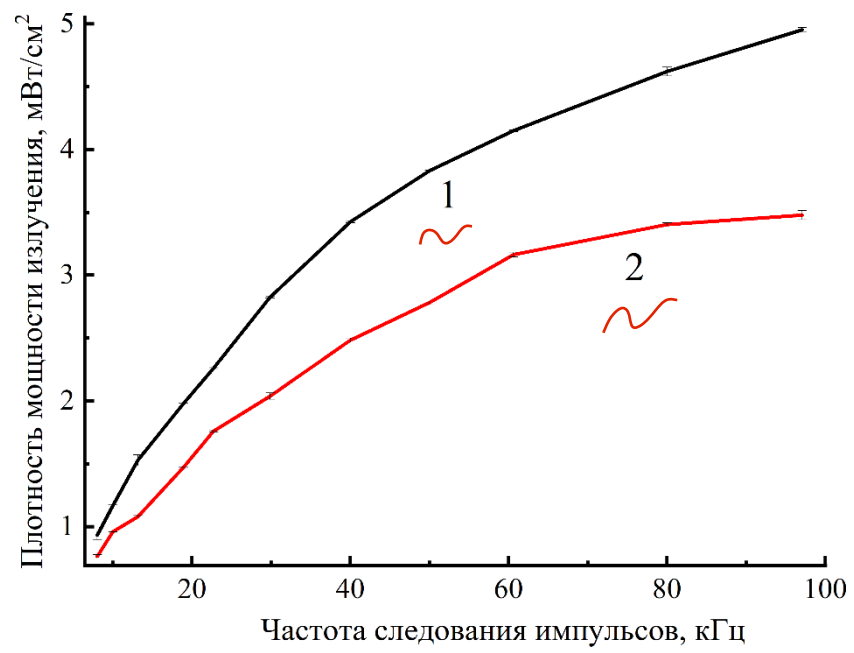


Рис. 3

Для связи с авторами:

Скакун Виктор Семёнович;

e-mail: skakun54@bk.ru

**Тарасенко Виктор Федотович** – тел.: 8-903-9539631;

e-mail: [vft@loi.hcei.tsc.ru](mailto:vft@loi.hcei.tsc.ru)

Панарин Виктор Александрович;

e-mail: panarin@loi.hcei.tsc.ru

Сорокин Дмитрий Алексеевич;

e-mail: [SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru](mailto:SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru)

Для переводчика:

## **SMALL-SCALE RADIATION SOURCE FOR AN EXCILMP WITH A WAVELENGTH OF 126 NM**

V. S. Skakun, V. F. Tarasenko\*, V. A. Panarin, D. A. Sorokin

*Institute of High Current Electronics SB RAS,*

*Russia, 634055 Tomsk, Akademichesky Ave., 2/3*

*\*e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru*

A compact radiation source of a relatively simple design with argon filling has been developed, which can be used to create VUV and UV excilamps. Its characteristics was investigated. To increase the radiation power on the second continuum of argon dimers ( $\lambda = 126$  nm), a method based on gas flow through a discharge region was used. At an excitation pulse repetition rate of 96 kHz, the radiation power density at  $\lambda = 126$  nm behind the output window made of of  $MgF_2$  was  $>5$  mW/cm<sup>2</sup> was obtained. It is shown that flow argon at a rate of 0.5–1 L/s through the discharge region makes it possible to stabilize the average power of VUV radiation at a level no worse than 2%.

*Keywords: emitter, argon exilamp, gas flow, 126 nm, MgF<sub>2</sub> window*

**SMALL SCALE RADIATION SOURCE FOR AN EXCILAMP WITH THE  
WAVELENGTH OF 126 NM**

**V. S. Skakun, V. F. Tarasenko\*, V. A. Panarin, D. A. Sorokin**

*Institute of High Current Electronics SB RAS,  
Russia, 634055 Tomsk, Akademichesky Ave., 2/3*

*\*e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru*

A compact radiation source of a relatively simple design with argon filling has been developed, which can be used to create VUV and UV excilamps. Its characteristics were investigated. To increase the radiation power on the second continuum of argon dimers ( $\lambda = 126$  nm), a method based on gas flow through the discharge region was used. At an excitation pulse repetition rate of 96 kHz, the radiation power density at  $\lambda = 126$  nm behind the output window made of MgF<sub>2</sub> greater than 5 mW/cm<sup>2</sup> was obtained. It is shown that argon flow at a rate of 0.5–1 l/s through the discharge region makes it possible to stabilize the average power of VUV radiation at a level no worse than 2%.

**Keywords:** *emitter, argon excilamp, gas flow, 126 nm, MgF<sub>2</sub> window*