

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 537.525

КОМПАКТНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ ДЛЯ ЭКСИЛАМПЫ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 126 нм

© 2024 г. В. С. Скакун^а, В. Ф. Тарасенко^{а,*}, В. А. Панарин^а, Д. А. Сорокин^а

^аИнститут сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

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

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.

После доработки 30.07.2023 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 MgF_2 получена плотность мощности излучения при длине волны $\lambda \approx 126$ нм более 5 мВт/см². 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%).

DOI: 10.31857/S0032816224030107 EDN: OVAPMW

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 при-

меняться 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 источни-

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

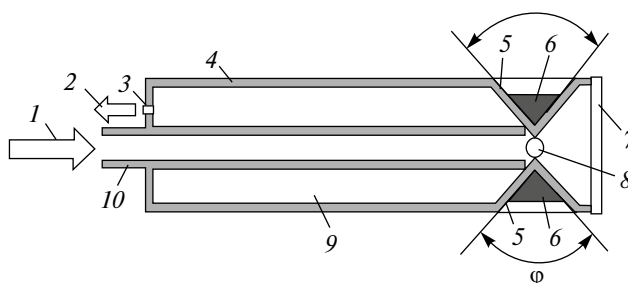


Рис. 1. Конструкция компактного излучателя: 1 — входной поток аргона, направленный в колбу излучателя, 2 — выходной поток аргона из колбы в окружающий воздух, 3 — отверстие в левом торце колбы, 4 — кварцевая трубка большего диаметра, 5 — часть трубки 4, имеющая форму конуса с закругленной вершиной, 6 — электроды, 7 — выходное окно из MgF_2 , 8 — область разряда, 9 — внутренняя часть камеры, заполняемая аргоном, 10 — трубка малого диаметра.

Внешние диаметры трубок 4 и 10 составляли соответственно 21 и 9 мм, а длина трубки большего 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 4. 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 полувысоте 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 см². 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.

Интенсивность, отн. ед.

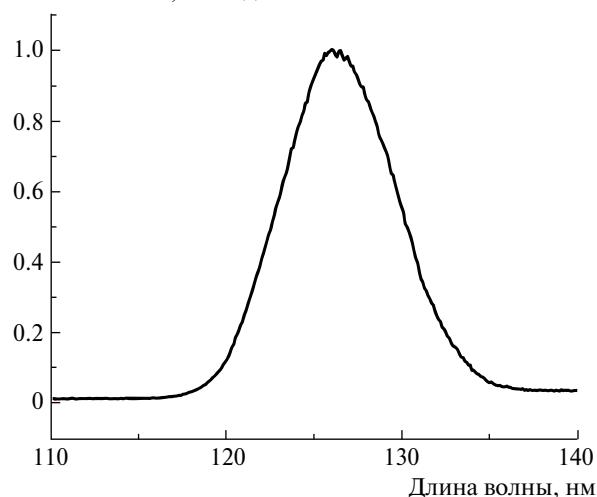


Рис. 2. Спектр излучения компактного излучателя эксилампы на димерах аргона при скорости прокачки 1 л/мин и частоте следования импульсов 96 кГц.

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 3×3 мм², от частоты следования импульсов представлены на 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

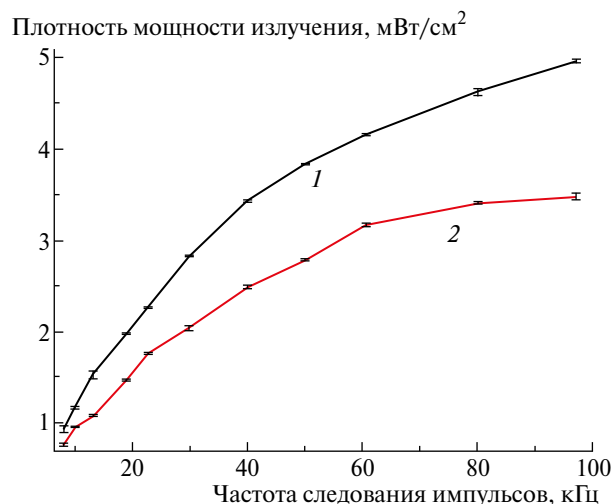


Рис. 3. Зависимости средней плотности мощности излучения димеров аргона на длине волны около 126 нм от частоты следования импульсов напряжения, полярность которых чередовалась. Скорость прокачки аргона 1 л/мин (1) и 0.5 л/мин (2), $|U| = 6.2$ кВ.

составляла 6.2 мВт/см². 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/см².

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_2 . 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. // Photo-Excited processes, Diagnostics and Applications. Boston: Springer, 2003. P. 161.
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., Dröbner 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., Шумиц 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., Шумиц Д.В. // ПТЭ. 2012. №4. С. 70.
8. Baricholo P., Hlatywayo 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>