

МАЛОГАБАРИТНАЯ ЭКСИЛАМПА С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 172 нм

© 2023 г. В. Ф. Тарасенко^{а,*}, В. С. Скакун^а,
В. А. Панарин^а, Д. А. Сорокин^а^аИнститут сильноточной электроники СО РАН
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

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

Поступила в редакцию 13.01.2023 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 09.03.2023 г.

Описана конструкция и приведены параметры малогабаритной эксилампы, имеющей оригинальный отпаянный излучатель, изготовленный из кварцевой трубки с внешним диаметром 21 мм. Исследованы характеристики излучения ксенона в вакуумной ультрафиолетовой области спектра. На полосе второго континуума ксенона, имеющего максимум на длине волны $\lambda \approx 172$ нм, при частоте следования импульсов 96 кГц получена плотность мощности излучения 30 мВт/см². Эксилампа использована для возбуждения полиметилметакрилата, в котором зарегистрирована полоса флуоресценции в области спектра 380–480 нм.

DOI: 10.31857/S0032816223050245, EDN: ZWJLLJ

ВВЕДЕНИЕ

Источники спонтанного излучения различных спектральных диапазонов находят широкое применение в различных областях науки и техники, продолжают работы по дальнейшему их совершенствованию [1–4]. В частности, большое внимание уделяется созданию эксиламп с отпаянными излучателями, заполненными ксеноном [5–9]. Ксеноновые эксилампы излучают в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра с высокой эффективностью. Доля энергии, излучаемая вторым континуумом молекулы Хе^{*} с максимумом полосы на длине волны 172 нм, достигает 90% от полной энергии излучения в области от 150 до 800 нм [1–3]. Для возбуждения эксиламп обычно используется импульсно-периодический барьерный разряд с частотой следования импульсов десятки килогерц. Установлено, что наибольшие эффективности излучения димеров ксенона на втором континууме реализуются при микросекундной длительности импульсов напряжения с фронтом 100–300 нс и давлении газа порядка атмосферного [7].

Излучателями ксеноновых эксиламп обычно являются отпаянные колбы с электродами, которые состоят из двух соосно расположенных трубок, см., например, [1]. Колбы изготавливаются из специального кварца, имеющего высокую прозрачность на рабочей длине волны. Излучение при этом выводится через боковую поверхность кварцевых трубок, покрытую сетчатым

электродом. В зависимости от области применения облучение проводят как внутри трубки малого диаметра, так и снаружи трубки большого диаметра. Эксилампы такой конструкции при плотности мощности излучения на поверхности трубки в десятки милливольт на квадратный сантиметр позволяют получать средние мощности излучения в десятки ватт [1–9].

Однако для ряда приложений нужны малогабаритные эксилампы с выходным пучком малого размера (с площадью ≤ 1 см²). Плотность мощности излучения на выходе из колбы при этом должна составлять десятки милливольт на квадратный сантиметр. Кроме того, для большинства применений удобнее иметь плоское выходное окно. Конструкция излучателя подобной эксилампы описана в патенте [10]. В пучке, выходящем из трубки с внутренним диаметром 10 мм, была получена плотность мощности излучения пристеночной области до 15 мВт/см². При уменьшении давления ксенона выходное излучение было однородно распределено по поперечному сечению выходного окна, но плотность мощности излучения и средняя мощность при этом существенно уменьшались.

Цель данной работы — создание для эксилампы на димерах ксенона излучателя простой конструкции с плоским выходным окном и плотностью мощности излучения десятки милливольт на квадратный сантиметр.

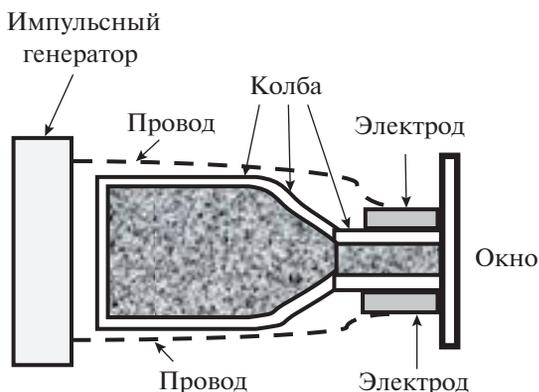


Рис. 1. Конструкция излучателя ксеноновой эксилампы.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ

Конструкция эксилампы для получения излучения на димерах ксенона с отпаянным излучателем, подключенным к источнику питания, представлена на рис. 1.

Колба излучателя была изготовлена из кварцевой трубки, имеющей внешний диаметр 21 мм и толщину стенки 1.5 мм. С правой стороны трубка при нагреве была сдавлена до получения эллипсоидальной формы с плоскими длинными сторонами. Длина этой части излучателя составила 17 мм. Переход от трубки к эллипсоиду имел длину около 10 мм. Выходное окно было изготовлено из кварцевой пластинки (GE-021) толщиной 2.18 мм, имеющей пропускание примерно 50% на длине волны 170 нм. Расстояние между внутренними стенками эллипсоидальной части трубки в первых экспериментах равнялось 6 мм, а после дополнительного сдавливания оно составило 4 мм. К противоположной стороне трубки приваривалась пластинка со штуцером, который после обезгаживания колбы и заполнения ее ксеноном высокой чистоты заваривался. Длина отпаянной колбы равнялась 100 мм. Прямоугольные электроды устанавливались вплотную к выходному окну, они имели длину 15 мм (вдоль оси колбы) и ширину 10 мм. Размер выходного окна обеспечивал защиту от поверхностного пробоя между электродами.

Возбуждение ксенона в колбе осуществлялось барьерным разрядом от генератора, который формировал попеременно импульсы положительной и отрицательной полярности. Частота следования световых импульсов f_1 могла изменяться от 3 до 96 кГц, при этом частота повторения пары импульсов генератора разной полярности $f = f_1/2$. Длительность импульсов напряжения на полувысоте составляла около 1 мкс, а длина их фронта на уровне 0.1–0.9 равнялась примерно 100 нс. По-

добный генератор описан в работе [4]. Измерения проводились как с излучателем, который был подключен к газовому пульту, так и с отпаянным излучателем.

Для измерения средней мощности излучения использовался измеритель мощности с головкой H8025-172, площадь приемной части которой равнялась 0.87 см². Кроме того, проводились измерения плотности мощности излучения в центральной части пучка через отверстие в экране размером 3 × 3 мм. Форма импульса излучения определялась с помощью ФЭУ ЕМ19781В. Спектр излучения в ВУФ-области записывался монохроматором VM-502 (Acton Researcher Corp.), а в ультрафиолетовой и видимой — спектрометром HR2000+ES (OceanOptics Inc.) с известными распределениями по длинам волн спектральных чувствительностей.

Напряжения на промежутке измерялось делителем АСА-6039 (АКТАКОМ), а ток разряда определялся сигналом с шунта сопротивлением 50 Ом. Электрические сигналы регистрировались осциллографом Tektronix TDS-3034 (0.3 ГГц, 2.5 выборки/нс). В качестве регистратора температуры использовалась термопара К-типа из комплекта мультиметра М-3870D (Metex), которая располагалась на заземленном электроде. Данные о мощности излучения и температуре колбы записывались при подключении к компьютеру мультиметра и измерителя мощности Hamamatsu C8026 через два СОМ-порта.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Испытания созданного малогабаритного источника излучения проводились для двух зазоров между внутренними стенками эллипсоидальной части колбы. С зазором $d = 6$ мм максимальная плотность мощности излучения на длине волны 172 нм из центральной части пучка площадью 9 мм² при оптимальном давлении ксенона 240 Торр составила примерно 26 мВт/см². В работе [10] наибольшая плотность мощности излучения с выходным окном из такого же кварца была около 15 мВт/см². С уменьшением внутреннего зазора в эллипсоидальной части колбы до 4 мм оптимальное давление ксенона увеличилось до 375 Торр и плотность мощности излучения димеров ксенона из центральной части пучка площадью 9 мм² возросла примерно до 30 мВт/см². Эти параметры были получены при частоте повторения генератора $f = 48$ кГц, формирующего последовательно пары импульсов положительной и отрицательной полярности. При этом частота следования отдельных импульсов напряжения амплитудой $|U| = 5.8$ кВ и, соответственно, излучения составляла $f_1 = 96$ кГц.

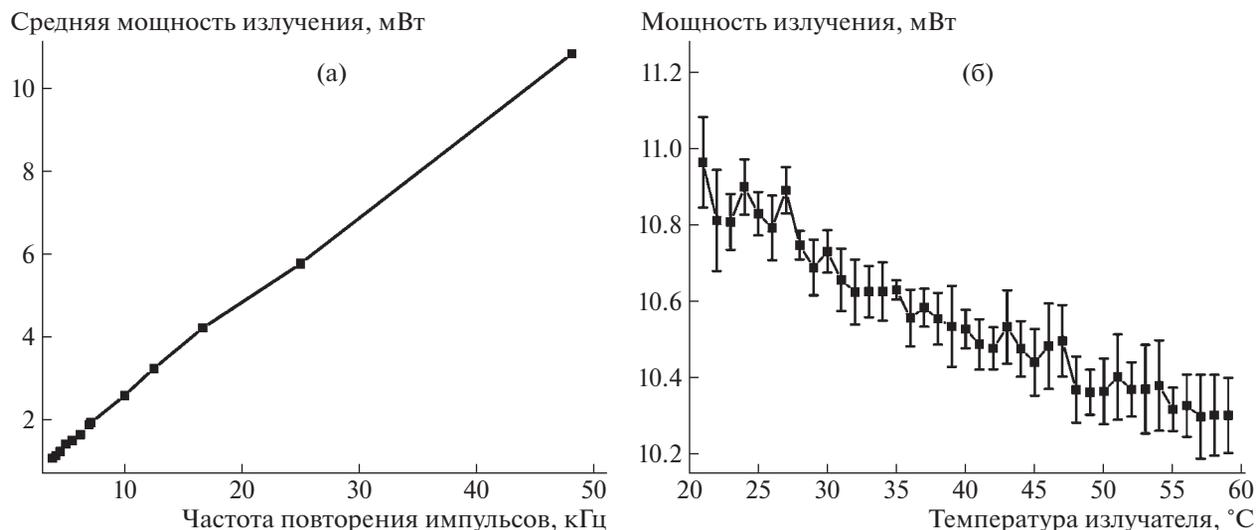


Рис. 2. Зависимости средней мощности излучения ксеноновой эксилампы с длиной волны 172 нм: **а** – от частоты f следования пар импульсов (положительной и отрицательной полярности); **б** – от температуры колбы, измеряемой у заземленного электрода при $f = 48$ кГц; $|U| = 5.8$ кВ.

Импульсы излучения имели треугольную форму с длительностью на полувысоте около 400 нс и длиной фронта 130 нс. Их форма и амплитуда не зависели от полярности импульсов напряжения. На рис. 2 приведены средние мощности излучения, фиксируемого приемником Н8025-172. При этом часть излучения в приемное окно не попадала.

Влияние частоты следования импульсов напряжения на среднюю мощность излучения показано на рис. 2а. Каждой точке соответствует среднее значение мощности излучения за 16 импульсов. Средняя мощность излучения линейно возрастает с увеличением частоты f , а также с ростом напряжения источника питания и давления ксенона. Однако рабочее давление ограничено напряжением пробоя ксенона. При напряжении $|U| = 5.8$ кВ и $d = 6$ мм пробой межэлектродного зазора происходит только до давления ксенона $p \approx 240$ Торр, а при $d = 4$ мм – до $p \approx 375$ Торр. Дальнейшее повышение рабочего давления ксенона может привести к увеличению средней мощности излучения, но для этого требуется дополнительная предыонизация ксенона в разрядном промежутке или дополнительный генератор для инициирования разряда.

При тестировании излучателя также было подтверждено существенное влияние температуры колбы около электродов на мощность излучения эксилампы [7]. Согласно рис. 2б, нагрев колбы до 60°C примерно через 10 мин непрерывной работы эксилампы привел к снижению мощности излучения на 10%. При этом комнатная температура была 23°C, влажность 45% и отсутствовало принудительное охлаждение. Далее температура колбы и средняя мощность излучения не изменя-

лись. После выключения генератора, охлаждения излучателя и последующего его включения энергетические характеристики эксилампы восстанавливались. На рис. 2б стандартное отклонение рассчитывалось на основе не менее чем пяти измерений.

Испытание отпаянного излучателя на ресурс показало, что за 400 ч работы, по 5–8 ч в день, его мощность уменьшилась примерно на 50%, а затем стабилизировалась.

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

Полиметилметакрилат (ПММА, акрил, орг-стекло) широко используется в сцинтилляционных и черенковских детекторах в медицинской дозиметрии для определения поглощенной дозы при облучении различными видами ионизирующего излучения, в частности электронным пучком [11, 12]. Однако в материале радиатора черенковского детектора, помимо излучения Вавилова–Черенкова (ИВЧ), также возникает флуоресценция за счет возбуждения электронами пучка и фотолюминесценция за счет ИВЧ, интенсивность которого возрастает с уменьшением длины волны [13]. Это может вносить дополнительный вклад в сигнал, регистрируемый ФЭУ, и исказить результаты измерения дозы облучения [11, 14]. Эксилампа с созданным излучателем была использована для проверки наличия фотолюминесценции в ПММА при воздействии излучением в ВУФ-области спектра. Для этого пластинка из ПММА толщиной 3 мм с коротковолновой границей пропускания 350 нм облучалась эксилампой с длиной вол-

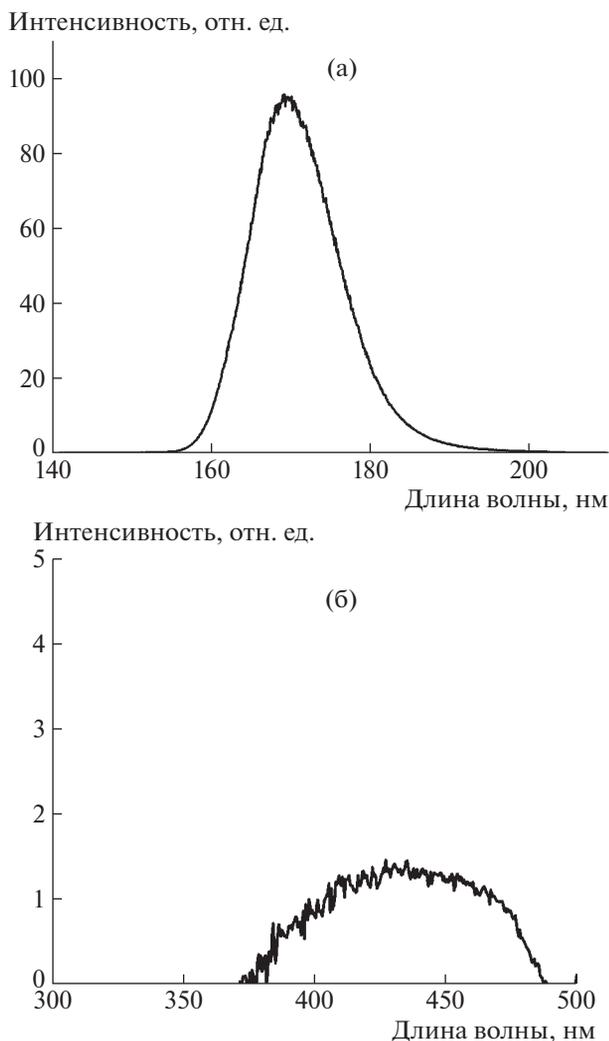


Рис. 3. Спектры излучения: **а** – ксеноновой эксилампы с длиной волны 172 нм; **б** – фотолюминесценции ПММА при облучении в течение 300 мс ксеноновой эксилампой с плотностью мощности излучения около 30 мВт/см².

ны $\lambda \approx 172$ нм. Спектр излучения приведен на рис. 3а. Пластика помещалась вплотную к плоскому выходному окну излучателя. Излучение с другой стороны пластинки по световоду, торец которого устанавливался на оси колбы, подавалось на спектрометр HR2000+ES. Спектры излучения и пропускания ПММА определялись с разрешением по длине волны примерно 0,9 нм. Для выделения спектра фотолюминесценции на фоне свечения разряда в ксеноне и люминесценции колбы излучение регистрировалось как при установке пластинки из ПММА, так и без нее. Затем определялась разница полученных сигналов с учетом поглощения в ПММА. Полученный спектр фотолюминесценции показан на рис. 3б.

Фотолюминесценция была зарегистрирована в области 380–480 нм. Примерно в этой же области ранее фотолюминесценция ПММА регистрировалась при возбуждении излучением КгСl-эксилампы и КгСl-лазера с длиной волны излучения около 222 нм [15]. Наличие излучения в области 380–480 нм подтверждает возможность преобразования коротковолнового ИВЧ, вызванного пучком высокоэнергетических электронов, в фотолюминесценцию ПММА [13].

ВЫВОДЫ

В работе описана эксилампа на димерах ксенона ($\lambda \approx 172$ нм) с малогабаритным отпаянным излучателем, предназначенная для облучения объектов малого размера, с площадью поверхности около 1 см² и менее. Возбуждение газа осуществлялось барьерным разрядом с частотой следования импульсов напряжения до 96 кГц. На выходе из плоского кварцевого окна получена плотность мощности излучения 30 мВт/см². Показано, что излучение в ВУФ-области спектра вызывает фотолюминесценцию ПММА в области 380–480 нм.

Отметим, что конструкция излучателя отличается простотой и является универсальной. При заполнении колбы другими газами ее можно использовать для создания эксиламп с различными длинами волн (207, 222, 283, 308 нм и т.д.). Используя выходные окна из кристаллов CaF₂, MgF₂ или LiF, подобные излучатели можно применять для получения излучения на димерах аргона ($\lambda \approx 126$ нм) и криптона ($\lambda \approx 146$ нм). Предполагаем, что созданный малогабаритный излучатель найдет спрос в различных областях, где необходима точечная подсветка ВУФ-излучением.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Д.С. Печеницина за создание источника питания для излучателя, а А.Н. Панченко и Н.П. Виноградова за помощь при измерениях спектров излучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2021-1026 от 15.11.2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gellert B., Kogelschatz U. // Appl. Phys. B. 1991. V. 52. P. 14. <https://doi.org/10.1007/BF00405680>

2. *Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Lomaev M.I.* UV and VUV excilamps. Deutschland/Germany, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. ISBN 978-3-695-21756-2.
3. *Oppenlander T.* Handbook of organic photochemistry and photobiology. Boca Raton, L., NY: CRC Press, 2012. V. 1. P. 21.
4. *Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Скакун В.С., Ерофеев М.В., Лисенко А.А.* // ПТЭ. 2006. № 5. С. 5.
5. *Mildren R.P., Carman R.J.* // Journal of Physics D: Applied Physics. 2001. V. 34. № 1. P. L1. www.iop.org/Journals/jd PII: S0022-3727(01)14862-X
6. *Arnold E., Lomaev M.I., Shitz D.V., Skakun V.S., Tarasenko V.F.* // In Proceeding International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers IV. Russia, Tomsk: SPIE, 2002. V. 4747. P. 345.
7. *Ломаев М.И., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 11. С. 68.
8. *Al-Gharabli S., Engeßer P., Gera D., Klein S., Oppenländer T.* // Chemosphere. 2016. V. 144. P. 811. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.012>
9. *Tsuji M., Kawahara T., Uto K., Kamo N., Miyano M., Hayashi J.I., Tsuji T.* // Environmental Science and Pollution Research. 2018. V. 25. № 19. P.18980. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2103-2>
10. *Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Скакун В.С., Панарин В.А.* Патент RU 2546144 // Оpubл. 10.04.2015. Бюллетень № 10.
11. *Lee B., Shin S.H., Yoo W.J., Jang K.W.* // Optical Review. 2016. V. 23. № 5. P. 806. <https://doi.org/10.1007/s10043-016-0240-8>
12. *Christensen J.B., Almhagen E., Nyström H., Andersen C.E.* // Physics in Medicine & Biology. 2018. V. 63. № 6. P. 065001. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aaafad>
13. *Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Ерофеев М.В., Бураченко А.Г.* // Оптика и спектроскопия. 2021. Т. 129. Вып. 5. С. 569. <https://doi.org/10.21883/OS.2021.05.50883.310-20>
14. *Araujo G.R., Pollmann T., Ulrich A.* // The European Physical Journal C. 2019. V. 79. № 8. P. 1. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-019-7152-2>
15. *Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф., Генин Д.Е., Пучикин А.В.* // Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 5. <https://doi.org/10.51368/2307-4469-2022-10-1-5-13>