## \_\_\_\_\_ ЛАБОРАТОРНАЯ \_\_\_\_ ТЕХНИКА

УДК 535-31:621.327

# ЭКСИЛАМПЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА С ВЫХОДНЫМ ОКНОМ МАЛОГО ДИАМЕТРА И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

© 2020 г. С. М. Авдеев<sup>*a*</sup>, А. Г. Бураченко<sup>*a*</sup>, В. А. Панарин<sup>*a*</sup>, В. С. Скакун<sup>*a*</sup>, Э. А. Соснин<sup>*a*,*b*,\*</sup>, В. Ф. Тарасенко<sup>*a*,*b*</sup>

<sup>а</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3 <sup>b</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36

\*e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru
 Поступила в редакцию 21.01.2020 г.
 После доработки 21.01.2020 г.
 Принята к публикации 23.01.2020 г.

Описан принцип действия и приведены технические параметры эксиламп с выходным окном малого диаметра из серии портативных источников узкополосного ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового излучения. Дан пример использования KrCl-эксилампы для возбуждения фотолюминесценции кристаллических материалов.

DOI: 10.31857/S0032816220040011

#### введение

Источники излучения на переходах эксимерных и эксиплексных молекул с возбуждением барьерным разрядом (б.р.) были изобретены и начали применяться в прошлом столетии [1–4]. Слово "эксилампа" является обобщающим названием класса устройств, излучающих спонтанное ультрафиолетовое (у.ф.) и/или вакуумное ультрафиолетовое (в.у.ф.) излучение эксимерных и эксиплексных молекул [3, 5]. Интерес к этому типу устройств в последние годы вновь стал расти [6–13]. Это связано с рядом особенностей излучения эксиламп, в частности:

1. В отличие от люминесцентных и тепловых источников излучения бо́льшая часть лучистого потока эксиламп сосредоточена в у.ф.- или в.у.ф.диапазоне спектра, в сравнительно узкой спектральной полосе полушириной от 2 до 15 нм для эксимеров инертных газов  $X_2^*$  [5, 11]. Такое излучение обеспечивает селективность при проведении различных фотопроцессов в лабораториях и на практике в задачах, где нужна узкополосность излучения, но не нужны его направленность и когерентность [8–12].

2. Полезный срок службы в лучших образцах излучателей эксиламп ( $t_r^k$  – период времени, когда происходит снижение потока излучения эксилампы на *k* процентов)  $t_r^{15-20} > 10000$  ч для хлорсодер-

жащих эксиламп. Часто этот параметр является решающим при использовании источника излучения в тех или иных приложениях.

3. Нет необходимости в специально пускорегулирующей аппаратуре, легкость зажигания с быстрым выходом на максимум мощности (<1 с). Питание излучателей эксиламп барьерного разряда осуществляется импульсами напряжения с амплитудой до нескольких киловольт и частотой до нескольких сотен килогерц. Это определяет сравнительную электробезопасность эксиламп б.р., поскольку разряд в колбе ограничен диэлектрическим барьером и ток разряда не превышает десятка миллиампер.

4. Разогрев колб до умеренных температур, что полезно при облучении объектов, чувствительных к термическому воздействию.

5. Отсутствие в рабочих смесях ртути, что важно, если учесть, что во всем мире происходит постепенный вывод из оборота ртутных ламп.

Кроме того, эксилампы б.р. отличаются разнообразием в конструктивном исполнении. Это позволяет создавать излучатели и источники питания, наиболее отвечающие условиям задачи.

Обычно используют излучатели эксиламп с колбами, состоящими из двух коаксиально расположенных трубок разного диаметра, которые располагаются в едином корпусе с источником питания и с вентиляторами системы охлаждения. Такие эксилампы имеют сравнительно большие



**Рис. 1.** Внешний вид портативной эксилампы. *1* – блок питания; *2* – излучатель.

размеры выходного окна. Однако в целом ряде задач требуется облучать узкополосным излучением объект, имеющий малые размеры (~1 см), причем место облучения необходимо оперативно менять.

В данной статье подробно описана эксилампа, возбуждаемая барьерным разрядом, с излучателем, имеющим выходное окно малого размера, и приведен пример ее использования для исследования фотолюминесценции.

#### ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

Рассматриваемые эксилампы б.р. (рис. 1) содержат блок питания *1* и излучатель *2* в диэлектрическом кожухе. Между нами имеется гибкое соединение с кабелем, длина которого обычно не превышает 1.5 м.

Излучатель (рис. 2) состоит из заполненной инертным газом или его смесью с галогеноносителем колбы 1 с сужением 2, на котором расположено плоское окно 3 для вывода излучения. Кроме того, в колбу герметично впаяна трубка 4. Перечисленные элементы выполнены из кварца, причем окно 2 из кварца марки КУ-1, необходимой для вывода излучения.

При подаче на электроды 5 и 6 импульсов напряжения от источника питания 7 происходит зарядка стенки трубки 4, прилегающей к электроду 5, и стенки сужения 2, пробой между ними и зажигание барьерного разряда (рабочая область разряда). Электрод 5 является сегментированным и занимает только часть внутренней поверхности трубки 4. Он является высоковольтным, а место его расположения обеспечивает электробезопас-



**Рис. 2.** Конструкция излучателя. *1* – колба; *2* – сужение на колбе; *3* – окно для вывода излучения; *4* – внутренняя трубка; *5* – сегментированный высоковольтный электрод; *6* – кольцевой электрод; *7* – источник питания.

ность устройства. Второй электрод 6 – заземленный – размещен на внешней стороне сужения 2.

Соотношение диаметров  $(d_1-d_3)$ , размеры электродов 5 и 6, расстояние между трубкой 4 и выходным окном 3 выбираются в зависимости от применяемой газовой смеси и параметров импульсов напряжения так, чтобы барьерный разряд зажигался только в рабочей области. Сравнительно малые амплитуды импульсов напряжения позволяют исключать потери на коронирование с краев высоковольтного электрода 5. Источник питания 7 обеспечивает короткие импульсы напряжения длительностью ~2 мкс с регулируемой частотой  $5 < f < 100 \ {\rm k}\Gamma$ ц.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Рассмотрим конкретную модель эксилампы, заполненную инертным газом ксеноном при следующих размерах колбы: длина 80 мм,  $d_1 = 40$  мм,  $d_2 = 23$  мм,  $d_3 = 19$  мм, длина сегментированного электрода 26 мм и его ширина 6–21 мм (рис. 2). В этом случае эксилампа становится источником в.у.ф.-излучения димеров ксенона Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup> с максимумом на длине волны  $\lambda = 172$  нм. Варьируя частоту импульсов напряжения, можно линейно управлять величиной энергетической светимости в центре выходного окна от 4.5 до 30 мВт/см<sup>2</sup> при длине питающего кабеля 1.5 м.

Интенсивность излучения в указанном широком диапазоне параметров отличалась стабильностью (длительность отдельных тестовых включений эксилампы достигала 40 ч) в силу циклической конвекции разогретого газа из зоны горения разряда в холодную зону колбы. Полученные величины энергетической светимости при длине кабеля 1.5 м были, по крайней мере, на 20% выше



**Рис. 3.** Распределение мощности излучения по окну Хе<sub>2</sub>-эксилампы при давлении ксенона 400 Торр.

аналогичных величин, полученных в источниках барьерного разряда других конструкций. При уменьшении длины кабеля величина энергетической светимости эксилампы существенно увеличивалась.

На рис. 3 показано распределение энергетической светимости излучения эксилампы по диаметру выходного окна (диаметр внутренней трубки колбы излучателя 23 мм) относительно центра окна по осям x и y (см. рис. 2). Измерения проводились с помощью приемника Hamamatsu UV Power Meter C8026. Видно, что, несмотря на неоднородность разрядного промежутка в направлении осей x и y, удается получить распределение интенсивности излучения, имеющее вершину, близкую к плоской.

Если при той же геометрии заполнить колбу смесью криптона и молекулярного хлора в соотношении Kr:Cl<sub>2</sub> = 200:1, то получим источник эксиплексного узкополосного излучения на молекулах KrCl\* с максимумом на длине волны  $\lambda = 222$  нм, полушириной полосы  $\Delta\lambda_{1/2} = 1.7$  нм и энергетической светимостью до 26 мВт/см<sup>2</sup>. Интенсивность излучения была стабильной при длительности отдельных тестов до 120 ч, что также связано с циклической конвекцией разогретого газа в колбе. При этом колебания интенсивности излучения,



**Рис. 4.** Спектры импульсной фотолюминесценции: I – природного алмаза типа IIa; 2 – синтетического алмаза типа IIa, полученного методом газофазного осаждения; 3 – CsI; 4 – Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, легированного Sn; 5 – Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, легированного Fe; 6 – ZnS.

характерные для похожей конструкции [14], отсутствовали.

Таким образом, конструкция разработанных эксиламп обеспечивает однородность засветки в плоскости выходного окна и высокий срок службы газовой среды. Созданную эксилампу удобно использовать для облучения образцов различных размеров, в том числе малых, вместе со стандартными спектрометрами, оснащенными световодами. При этом, вход световода можно располагать на боковой поверхности плоских образцов, что защищает спектрометр от попадания излучения эксилампы.

Эксилампы этой серии могут применяться при постановке различных научных исследований. Например, они были использованы при исследовании фотолюминесценции в различных веществах [15–17]. На рис. 4 приведены спектры импульсной фотолюминесценции в шести образцах различных материалов при облучении их KrClэксилампой с длиной волны 222 нм.

Для регистрации спектров использовался спектрометр HR2000+ES (спектральный диапазон 190–1100 нм, полуширина инструментального контура 9 Å, Ocean Optics, Inc.) со световодом P600-1-SR (спектральный диапазон 200–1100 нм, диаметр сердцевины 600 мкм, Ocean Optics, Inc.). Отметим, что с помощью спектрометра регистрируется только плотность энергии излучения. Однако и в этом случае на рис. 4 хорошо видно отличие спектров фотолюминесценции не только в алмазе и CsI, но и в природном, и синтетическом алмазах. Это позволяет их легко различать. Кроме того, наблюдается существенное отличие в интенсивности фотолюминесценции двух образцов алмаза, которая на порядок больше из-за большей концентрации примесей в природном алмазе. Также существенно отличаются спектры  $Ga_2O_3$  при его легировании различными металлами. Для получения большей информации об образцах можно изменять длину волны излучения эксилампы, используя излучатели с различным газовым наполнением.

Установлено [5, 7], что наибольшие мощности и эффективности излучения в отпаянных эксилампах, возбуждаемых барьерным разрядом, достигаются на длинах волн 172, 222, 283 и 308 нм. Их и рекомендуется применять на практике.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметры и конструкция портативных эксиламп барьерного разряда делают их удобным средством для проведения исследований, в которых необходима локальная засветка объектов узкополосным у.ф.- или в.у.ф.-излучением для получения научной и практической информации, в частности, для исследования фотолюминесценции [15–17], в капиллярной дефектоскопии [18] и других областях [19]. Меняя газовое наполнение излучателей эксиламп, можно получать узкополосное излучение с максимумами на длинах волн 308, 222, 283, 222 и 172 нм с энергетической светимостью до 20–30 мВт/см<sup>2</sup> и решать различные научные и практические задачи.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института сильноточной электроники СО РАН по теме № 13.1.4.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Волкова Г.А., Кириллова Н.Н., Павловская Е.Н., Яковлева А.В. // Журн. прикладной спектроскопии. 1984. Т. 41. Вып. 4. С. 681.
- Esrom H., Kogelschatz U. // Thin Solid Films. 1992.
  V. 218. Issues 1–2. P. 231. https://doi.org/10.1016/0040-6090(92)90923-Y
- Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 1. С. 7.

- Boyd I.W., Zhang J.-Y. // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1997. V. B121. Issues 1–4. P. 349. https://doi.org/10.1016/S0168-583X(96)00538-1
- Ломаев М.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201. https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200302d.0201
- Соснин Э.А., Авдеев С.М., Кузнецова Е.А., Лаврентьева Л.В. // ПТЭ. 2005. № 5. С. 111.
- 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.
- Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F. // J. Photochem. Photobiol. C: Reviews. 2006. V. 7. P. 145. https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2006.12.002
- Le Duff1 F, Fontas E., Giacchero D., Sillard L., Lacour J.-P., Ortonne 1 J.-P., Passeron T. // British J. Dermatology. 2010. V. 163. Issue 1. P. 188. https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2010.09778.x
- Zhuang X., Han Q., Zhang H., Feng X., Roth M., Rosier O., Zhu S., Zhang S. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V. 43. Issue 20. P. 1. https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/20/205202
- Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. УФ- и ВУФ-источники спонтанного излучения (эксилампы) // Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул / Под ред. В.Ф. Тарасенко. Томск: STT Publishing, 2014. С. 400.
- Соснин Э.А., Авдеев С.М., Тарасенко В.Ф., Скакун В.С., Шитц Д.В. // ПТЭ. 2015. № 3. С. 5. https://doi.org/10.7868/S003281621503012X
- Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // Фотоника. 2015. № 1(49). С. 60.
- Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. Патент на изобретение RU 2559806 C1 // Опубл. 10.08.2015. Бюл. № 22.
- Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Патент на полезную модель RU № 71166 U1 // Опубл. 27.02.2008. Бюл. № 6.
- Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Beloplotov D.V., Kozyrev A.V. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45.№ 1. P. 76. https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2637570
- Sorokin D.A., Burachenko A.G., Beloplotov D.V., Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Lipatov E.I., Lomaev M.I. // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. P. 093304. https://doi.org/10.1063/1.4996965
- Калиниченко А.Н., Соснин Э.А., Авдеев С.М., Калиниченко Н.П., Истомин К.А. // Дефектоскопия. 2017. № 1. С. 51.
- Sosnin E.A., Gol'tsova P.A., Chudinova Y.V., Lyasheva L.V., Panarin V.A., Prok I.A., Skakun V.S., Viktorova I.A., Astaphyrova T.P. // Proc. SPIE (XIV International Conference on Pulsed Lasers and Laser Applications, 11 December 2019. V. 11322. P. 1132226. https://doi.org/10.1117/12.2541532