

## Планарные эксилампы барьерного разряда

С.М. Авдеев, М.В. Ерофеев, Э.А. Соснин, В.Ф. Тарасенко\*

*Институт сильноточной электроники СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 14.05.2008 г.

Проведено сравнительное исследование энергетических и спектральных характеристик излучения в бинарных смесях Kr–Cl<sub>2</sub>, Xe–Cl<sub>2</sub>, Xe–Br<sub>2</sub>, Ar–Cl<sub>2</sub>, Kr–Br<sub>2</sub> в диапазоне давлений от десятков до 200 торр в барьерном разряде планарной эксилампы. В ряду XeCl-, XeBr-, KrCl-, KrBr-, Cl<sub>2</sub>-эксилампы получены плотности мощности излучения 39; 30; 19,3; 11,4; 9,9 мВт/см<sup>2</sup>. Сравнение с коаксиальными эксилампами барьерного разряда в оптимальных (с точки зрения средней мощности излучения и равномерности заполнения колбы микрозарядами) условиях выявило, что эффективности планарных эксилампы ниже. В планарной конструкции получено близкое к равномерному распределение светового потока по окну.

*Ключевые слова:* эксилампа, ультрафиолетовое излучение, барьерный разряд, XeCl, XeBr, KrCl, KrBr, Cl<sub>2</sub>.

В последние два десятилетия источники спонтанного ультрафиолетового (УФ) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения связанно-свободных переходов эксимерных (R<sub>2</sub><sup>\*</sup>, X<sub>2</sub><sup>\*</sup>) или эксиплексных (RX<sup>\*</sup>) молекул, где R – инертные газы (Ar, Kr, Xe), а X – галогены (F, Br, Cl, I), стали объектом многих исследований (см. обзоры [1–4] и ссылки в них). Спектр эксилампы, как правило, сосредоточен в одной сравнительно узкой и интенсивной полосе излучения. Полуширина полосы от 2 до 15 нм для молекул RX<sup>\*</sup> и до ~30 нм для молекул R<sub>2</sub><sup>\*</sup>. Кроме излучения интенсивных полос B → X спектр плазмы эксиплексных молекул RX<sup>\*</sup> может содержать полосы других переходов D → X, C → A, D → A той же самой молекулы. В условиях повышенных давлений (> 100 торр) их интенсивность пренебрежимо мала [1, 4–6].

Чаще всего для возбуждения барьерного разряда (БР) используют эксилампы коаксиальной конструкции [2, 3, 5–10]. Эксилампы БР на галогенидах инертных газов планарной конструкции исследованы сравнительно мало.

В [11] проведены спектральные исследования эксилампы с площадью окна 4,7 см<sup>2</sup> в смесях Kr–Br<sub>2</sub>, Kr–I<sub>2</sub>. В условиях, когда B → X-полоса KrBr\*-молекулы наиболее интенсивна, при давлении 285 торр, получена средняя мощность 3 мВт. В [12] в смесях He–Kr–Cl<sub>2</sub> проведены исследования спектральных и энергетических характеристик эксилампы с площадью окна 10 см<sup>2</sup>. Получены эффективности и плотности мощности излучения 15% и 100 мВт/см<sup>2</sup>, но впоследствии эти результаты воспроизвести не удалось.

В [13] в смесях Kr–Xe–Cl<sub>2</sub> проведены подробные исследования спектральных и энергетических характеристик излучения молекул XeCl\* и KrCl\* в поверхностном барьерном разряде с площадью окна 100 см<sup>2</sup>. Получены эффективности и плотности мощности излучения 8% и 6 мВт/см<sup>2</sup>.

Расширенные сравнения условий формирования спонтанного излучения в барьерном разряде в одинаковых условиях возбуждения нам неизвестны. В данной статье приведены результаты систематического исследования этих условий.

Эксперименты проводились на установке, представленной на рис. 1.

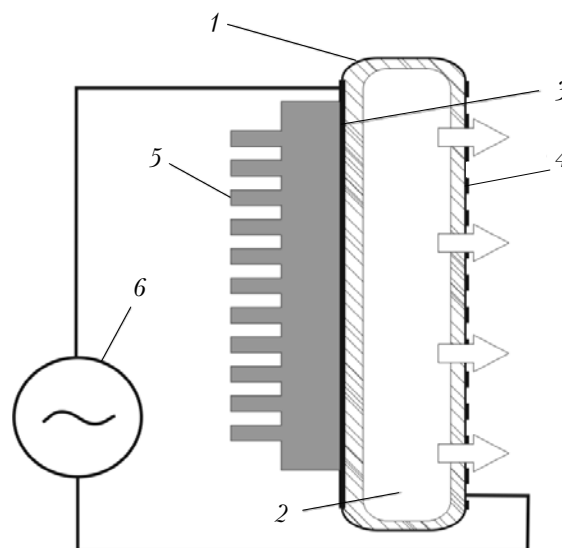


Рис. 1. Конструкция установки: 1 – планарная колба; 2 – газоразрядный объем; 3 – сплошной отражающий электрод; 4 – перфорированный электрод; 5 – радиатор; 6 – импульсный источник питания. Стрелками показано направление вывода излучения

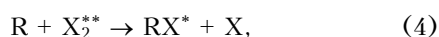
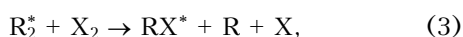
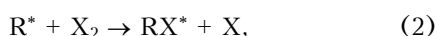
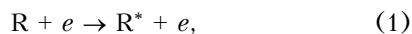
\* Сергей Михайлович Авдеев (semiavd@sibmail.com); Михаил Владимирович Ерофеев (michael@loi.hcei.tsc.ru); Эдуард Анатольевич Соснин (badik@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

Колба 1 была выполнена из кварцевых пластинок, имеющих пропускание на  $\lambda = 200$  нм более 90% и образующих газоразрядный промежуток  $d = 8$  мм. Перфорированный электрод 4 был выполнен из металлической сетки с пропусканием 72%. Диаметр выходного окна составлял 5,8 см, а площадь 26,4 см<sup>2</sup>. Сплошной электрод-отражатель 3 был изготовлен из алюминивно-магниевой фольги. Возбуждение газовой среды в промежутке 2 между кварцевыми пластинами осуществлялось от генератора импульсов напряжения, имеющих форму меандра, амплитуду до 5 кВ и длительность 1,5 мкс. Частота следования импульсов  $f$  составляла 117 кГц.

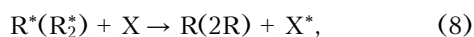
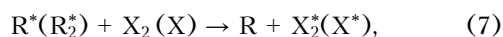
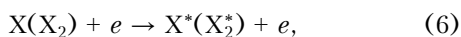
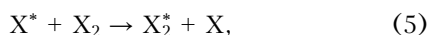
В экспериментах варьировались парциальное давление и соотношение галогена ( $\text{Br}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ) и инертного газа (Ar, Kr, Xe), кроме того, измерялись мощность излучения, вводимая в разряд мощность и регистрировались спектры излучения. Общее давление смесей в наших опытах не превышало 400 торр. Чтобы обеспечить условия стабильной работы эксилампы, к электроду 3 крепился радиатор 5 из латуни для охлаждения излучателя. Температура выходного окна во время опытов не превышала 75 °С.

Мощность излучения лампы определялась с помощью фотоприемника HAMAMATSU H8025-222 с максимумом спектральной чувствительности на 222 нм. Обзорный спектр излучения разряда регистрировался спектрометром StellarNet EPP2000-C25 (StellarNet Inc.) на основе многоканальной п.э.с.-линейки Sony ILX511 (рабочий диапазон 200–850 нм, спектральная полуширина его аппаратной функции не превышает 1,5 нм), а уточненный спектр – при помощи аппаратного комплекса, состоявшего из двух спектрометров HR4000 (Ocean Optics B.V.), перекрывающих диапазон 200–350 нм, с решеткой 2400 штр./мм. Вводимая мощность определялась по осциллограммам импульсов напряжения и тока. Осциллограммы тока и напряжения с токового шунта и делителя напряжения регистрировались осциллографом TDS 224 (Tektronics Inc.).

Образование эксиплексных молекул в исследованном нами диапазоне давлений ( $p < 200$  торр), т.е. при умеренных давлениях, происходит в реакциях [15–18]:



а молекул  $\text{Cl}_2^*$  и  $\text{Br}_2^*$  в реакциях [16, 17]:



поэтому спектры излучения содержат не только полосы эксиплексных молекул  $\text{XeCl}^*$ ,  $\text{XeBr}^*$ ,  $\text{KrCl}^*$  и  $\text{KrBr}^*$ , но и полосы молекул  $\text{Cl}_2^*$  и  $\text{Br}_2^*$ .

Спектры излучения в смесях  $\text{Kr}-\text{Cl}_2$ ,  $\text{Xe}-\text{Cl}_2$  и  $\text{Xe}-\text{Br}_2$  в оптимальных условиях (с точки зрения средней мощности излучения и равномерности заполнения колбы микрозарядами) при общем давлении около 120 торр состояли из интенсивных полос  $B \rightarrow X$  эксиплексных молекул  $\text{KrCl}^*$  (222 нм),  $\text{XeCl}^*$  (308 нм) и  $\text{XeBr}^*$  (283 нм) с полушириной  $\Delta\lambda_{1/2} = 1,6$ ; 2,5 и 1,8 нм соответственно. Интенсивность полос других переходов  $D \rightarrow X$ ,  $C \rightarrow A$ ,  $D \rightarrow A$  была низкой и с увеличением давления снижалась.

Спектр излучения при возбуждении смеси  $\text{Ar}-\text{Cl}_2$  в области 200–850 нм при давлениях около 300 торр имел одну интенсивную полосу  $D' \rightarrow A'$  молекулы  $\text{Cl}_2^*$  с полушириной  $\Delta\lambda_{1/2} \sim 5$  нм.

Спектр излучения в смеси  $\text{Kr}-\text{Br}_2$  состоял из интенсивных  $B \rightarrow X$ -полос молекулы  $\text{KrBr}^*$  с максимумом на 207 нм, суммы слабых полос  $C \rightarrow A$  (222 нм),  $D \rightarrow A$  (228 нм) и полосы  $D' \rightarrow A'$  (291 нм) молекулы  $\text{Br}_2^*$ . Уменьшение доли брома в ряду смесей  $\text{Kr}/\text{Br}_2 = 100/1 \rightarrow 400/1$  вело к росту вклада в излучение полос молекулы  $\text{KrBr}^*$  и относительно слабому росту интенсивности полос  $\text{Br}_2^*$ . При фиксированном соотношении  $\text{Kr}/\text{Br}_2$  в смеси увеличение давления смеси всегда вело к росту вклада в излучение полос молекулы  $\text{KrBr}^*$ , а вклад полосы  $D' \rightarrow A'$  молекулы  $\text{Br}_2^*$  почти не менялся. В оптимальных условиях при общем давлении около 190 торр спектры излучения состояли из интенсивных полос  $B \rightarrow X$  эксиплексных молекул  $\text{KrCl}^*$  (222 нм) и  $\text{XeCl}^*$  (308 нм) с полушириной  $\Delta\lambda_{1/2} = 1,6$  и 2,8 нм.

Во всех случаях, кроме смеси  $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ , барьерный разряд при низких давлениях имел форму объемного свечения. С увеличением давления на фоне объемного свечения появлялись отдельные микрозаряды, их интенсивность росла, а фона падала. Вначале количество микрозарядов было велико, а при переходе к высоким давлениям ( $p > 120$  торр) их число уменьшалось вплоть до одного яркого микрозаряда.

На рис. 2 представлены характерные зависимости мощности и эффективности излучения от давления инертного газа в смеси  $\text{Xe}-\text{Br}_2$ . Максимальные величины были достигнуты при  $p \sim 120$  торр. Условия в разряде в этом случае оптимальны.

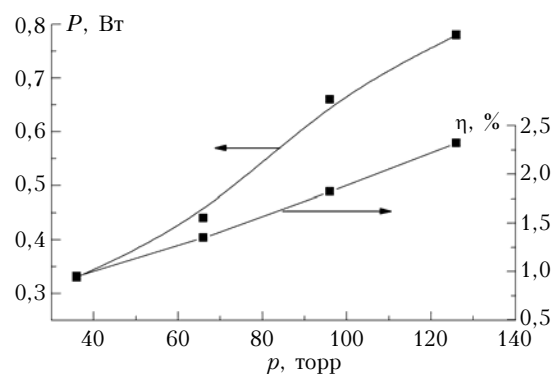


Рис. 2. Зависимость средней мощности излучения и эффективности эксилампы в газовой смеси  $\text{Xe}-\text{Br}_2 = 400-1$  от давления инертного газа

В смеси Ar—Cl<sub>2</sub> разряд однородно заполнял колбу во всем диапазоне давлений (до 400 торр).

Лучшие результаты, достигнутые в оптимальных (в указанном выше смысле) условиях, представлены в таблице.

**Характеристики планарных эксилламп барьерного разряда**

Эксиллампа	Соотношение компонент газовой смеси R / X <sub>2</sub>	Общее давление смеси, торр	Плотность мощности излучения, мВт/см <sup>2</sup>	Эффективность, %
XeBr	400/1	126	30	2,3
KrBr	400/1	195	11,4	0,9
XeCl	400/1	144	39	3
KrCl	400/1	171	19,3	1,5
Cl <sub>2</sub>	400/1	310	9,9	0,75

Из таблицы видно, что мощность излучения и эффективность эксилламп падают в ряду эксилламп XeCl > XeBr > KrCl > KrBr > Cl<sub>2</sub>. Сравним эти результаты с полученными при возбуждении тех же сред в условиях БР в коаксиальной конструкции эксилламп. Например, в KrBr-, Cl<sub>2</sub>-, KrCl-эксиллампах БР коаксиального типа, в оптимальных условиях, плотность мощности излучения составила ~12,5; 2,4; 28 мВт/см<sup>2</sup> при эффективности излучения 1,9; 0,45; 5,2% соответственно [14]. Вероятной причиной сравнительно низких величин эффективности излучения в эксиллампах БР планарного типа является их несогласованность с генератором высоковольтных импульсов. Кроме того, изменился тепловой режим работы лампы: одна из стенок планарной эксилламп не охлаждалась, а при эксплуатации коаксиальных эксилламп БР поверхности колбы всегда охлаждаются либо струей воздуха, либо водой [9]. Вопрос о тепловом режиме планарных эксилламп, следовательно, требует дополнительного изучения.

Пространственное распределение излучения по выходному окну планарных эксилламп было неоднородным. Но если облучаемый объект располагать не вплотную, а на расстоянии 5 см от плоскости лампы, то можно получить облучение, близкое к равномерному в пятне диаметром 5 см с разницей по интенсивности в центре и на краях ~25%. При использовании коаксиальной эксилламп такое пространственное распределение получить нельзя, поэтому на практике использовать эксилламп планарного типа можно в случаях, когда требуется равномерное облучение.

Таким образом, в диапазоне давлений смесей галогена (Br<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>) и инертного газа (Ar, Kr, Xe) от десятков до 200 торр проведены систематические исследования спектральных и энергетических характеристик эксилламп на нескольких рабочих молекулах. Сравнение с коаксиальными эксиллампами барьерного разряда в оптимальных (с точки зрения средней мощности излучения и равномерности заполнения колбы микроузлами) условиях выявило, что эффективности планарных эксилламп ниже. Однако преимуществом барьерного разряда в эксиллампах планарного типа является возможность получения равномерного распределения светового потока по окну.

Авторы выражают свою признательность В.В. Силицыну и Д.В. Шитцу за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 3583р).

- Gellert B., Kogelschatz U. Generation of excimer emission in dielectric-barrier discharges // Appl. Phys. B. 1991. V. 52. P. 14–21.
- Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Эксиллампы – источники спонтанного УФ- и ВУФ-излучения // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. 2005. Сер. Б. Т. XI-4. М.: Физматлит, 2005. С. 522–546.
- Sosnin E.A., Oppenländer T., Tarasenko V.F. Applications of Capacitive and Barrier Discharge Excilamps in Photoscience // J. Photochem. Photobiol. C: Reviews. 2006. V. 7. P. 145–163.
- Boyd I.W., Zhang J.-Y., Kogelschatz U. Development and Applications of UV Excimer Lamps // Photo-Excited processes, Diagnostics and Applications / Ed. A. Peled (The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003). P. 161–199.
- Sosnin E.A., Erofeev M.V., Lisenko A.A., Lomaev M.I., Shitz D.V., Tarasenko V.F. Spectra of UV excilamps excited by glow, barrier and capacitive discharges // Proc. of the 34<sup>th</sup> EGAS (Sofia, Bulgaria, 09–12.07.02). 2002. P. 345–346.
- Лисенко А.А., Ломаев М.И. Спектры излучения эксилламп емкостного, барьерного и тлеющего разрядов в смесях Kr—Cl<sub>2</sub>, Xe—Cl<sub>2</sub>, Xe—Br<sub>2</sub>, Xe—I<sub>2</sub> // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 3. С. 293–297.
- Falkenstein Z., Coogan J.J. The development of a silent discharge driven XeBr\* excimer UV light source // J. Phys. D. 1997. V. 30. N 19. P. 2704–2810.
- Ломаев М.И., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Мощная и эффективная KrCl эксиллампа барьерного разряда // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 1. С. 74–80.
- Ломаев М.И., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Скакун В.С., Ерофеев М.В., Лисенко А.А. Эксилламп барьерного и емкостного разряда и их приложения // Приборы и техн. эксперим. 2006. № 5. С. 5–26.
- Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Оптические характеристики плазмы эксилламп барьерного разряда на димерах галогенов I<sub>2</sub><sup>\*</sup>, Cl<sub>2</sub><sup>\*</sup>, Br<sub>2</sub><sup>\*</sup> // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 103. № 4. С. 554–560.
- Feng X., Zhu S. Investigation of excimer ultraviolet sources from dielectric barrier discharge in krypton and halogen mixtures // Phys. scr. 2006. V. 74. P. 322–325.
- Neiger M. Dielectric Barrier Discharges: An Unusual New Light Source // Proc. of 6<sup>th</sup> Int. Symp. of the Science and Technology of Light Source. Budapest, 1992. P. 75–82.
- Guivan N.N., Janča J., Brablec A., Stahel P., Slavicek P., Shimon L.L. Planar UV excilamp excited by a surface barrier discharge // J. Phys. D. 2005. V. 38. P. 3188–3193.
- Шитц Д.В., Ерофеев М.В., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Авдеев С.М. Эксилламп барьерного разряда с плоским выходным окном // Приборы и техн. эксперим. 2008. (В печати).
- Boichenko A.M., Skakun V.S., Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. Emission Efficiency of Excimer and Excimer Molecules Pumped by a Barrier Discharge // Laser Phys. 2000. V. 10. N 2. P. 540–552.
- Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Сулов А.И., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Спектральные и энергетические характеристики многополосных KrBr-эксилламп барьерного разряда // Квант. электрон. 2008. Т. 38. (В печати).

17. Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Излучение молекул  $\text{Cl}_2^*$  в барьерном разряде // Квант. электрон. 2008. Т. 38. (В печати).

18. Авдеев С.М., Зверева Г.Н., Соснин Э.А. Исследование условий эффективной люминесценции  $\text{I}_2^*$  (342 нм) в барьерном разряде в смеси  $\text{Kr-I}_2$  // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 103. № 6. С. 946–955.

*S.M. Avdeev, M.V. Erofeev, E.A. Sosnin, V.F. Tarasenko. Planar exciplex lamp excited by barrier discharge.*

The comparative study of power and spectral characteristics of barrier discharge planar excilamp in binary mixes  $\text{Kr-Cl}_2$ ,  $\text{Xe-Cl}_2$ ,  $\text{Xe-Br}_2$ ,  $\text{Ar-Cl}_2$ ,  $\text{Kr-Br}_2$  is carried out. In a row of  $\text{XeCl-}$ ,  $\text{XeBr-}$ ,  $\text{KrCl-}$ ,  $\text{KrBr-}$ ,  $\text{Cl}_2$ -excilamps the density of radiant exitance of 39, 30, 19.3, 11.4, 9.9  $\text{mW/cm}^2$  are obtained. The comparison with coaxial barrier discharge excilamps in optimum (from the point of view of radiant power and uniformity of bulb filling by the microdischarges) conditions has revealed, that the efficiency of planar excilamp is lower. In a planar design the distribution of a light flow was nearly uniform at output window.