

А.А. Лисенко, М.И. Ломаев

## Спектры излучения эксиплексных ламп емкостного, барьерного и тлеющего разрядов в смесях $Kr-Cl_2$ , $Xe-Cl_2$ , $Xe-Br_2$ , $Xe-I_2$

*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 26.12.2001 г.

Представлены спектры излучения эксиплексных ламп емкостного разряда в смесях  $Kr-Cl_2$ ,  $Xe-Cl_2$ ,  $Xe-Br_2$ ,  $Xe-I_2$ , барьерного и тлеющего разрядов в смесях  $Kr-Cl_2$ ,  $Xe-Cl_2$ . Для барьерного разряда в смеси  $Xe-Cl_2$  приведены и сопоставлены спектры для различных давлений (60 и 120 торр). Получена зависимость спектра излучения  $Kr-Cl_2$ -эксиплампы от времени наработки.

1. Эксиплампы – относительно недавно появившийся класс источников спонтанного излучения в УФ- и ВУФ-областях спектра, основанный на использовании неравновесного излучения так называемых эксимерных или эксиплексных молекул. Особенностью этих молекул являются их устойчивость в электронно-возбужденном состоянии и отсутствие прочной связи в основном. Ряд таких молекул имеет интенсивный В-Х-переход в УФ- или ВУФ-диапазонах спектра, что позволяет с высокой эффективностью (до  $\approx 60\%$ ) трансформировать введенную в среду энергию в оптическое излучение. В настоящее время эксиплампы используются в фотохимии, микроэлектронике, для модификации свойств поверхности, в медицине, в технологиях обеззараживания промышленных отходов, воды, воздуха и так далее, что объясняет то достаточно большое внимание, которое уделяется их исследованию [1–11]. Как правило, для возбуждения рабочей среды на практике используются различные типы самостоятельного разряда – тлеющий, барьерный, емкостной, разряд высокого давления с УФ-предйонизацией.

Основным отличием эксиплампы от уже имеющихся люминесцентных – ртутных и водородных ламп, а также тепловых источников спонтанного излучения УФ- и ВУФ-диапазонов являются спектр и удельная мощность излучения. До  $\sim 80\%$  и более от общей мощности излучения может быть сосредоточено в относительно узкой (менее 10 нм на полувысоте) полосе В-Х-перехода соответствующей молекулы. Реализованы также условия, при которых излучают две и более эксиплексные молекулы. Характерные удельные мощности излучения эксиплампы превышают данные характеристики для водородных ламп и ртутных ламп низкого давления.

Потенциальными достоинствами эксиплампы с точки зрения их применения являются величина энергии фотона (4–10 эВ), спектральная селективность, высокая удельная мощность излучения, возможность масштабирования и выбора произвольной геометрии

излучающей поверхности. Отдельно следует отметить факт отсутствия ртути в данных устройствах, что обеспечивает им преимущество относительно широко распространенных, но экологически небезопасных ртутьсодержащих ламп.

С точки зрения практического применения наряду с такими параметрами, как эффективность, удельная выходная мощность, ресурс работы, спектр излучения эксиплампы и его стабильность являются одними из наиболее важных эксплуатационных характеристик. Настоящая статья посвящена определению и сопоставлению спектров излучения эксиплампы емкостного, тлеющего и барьерного разрядов, разработанных в лаборатории оптических излучений ИСЭ СО РАН [9–14].

2. Регистрация спектров излучения из разряда осуществлялась специальным комплексом, включавшим монохроматор МДР-23 (обратная линейная дисперсия 1,3 нм/мм) с решеткой 1200 штр./мм, широкополосный фотоумножитель ФЭУ-100, осциллограф ТДС 3032 и компьютер. Оптический сигнал при возбуждении эксиплампы от повышающего сетевого трансформатора (лампа тлеющего разряда) или генератора импульсов с частотой повторения до 100 кГц (емкостной или барьерный разряды) подавался на входную щель монохроматора. Электрический сигнал с фотоумножителя поступал на осциллограф, оцифровывался, а далее информация передавалась в компьютер и запоминалась.

При соответствующей обработке полученной информации можно было получать спектр излучения эксиплампы для определенного момента времени относительно начала импульса возбуждения, а также интегральный спектр по всей длительности импульса излучения. В первом случае получали спектр излучения по мощности для конкретного момента времени, во втором – по энергии импульса излучения аналогично тому, как это имеет место при традиционной фотографической регистрации спектра. В данной статье приведены интегральные по всей длительности

импульса спектры излучения. Спектральная полуширина аппаратной функции комплекса при минимальной скорости вращения дифракционной решетки составляла не более 0,02 нм. Данный режим использовался при определении профиля линий или полос излучения. При регистрации обзорных спектров (в широком спектральном интервале) скорость вращения дифракционной решетки увеличивалась, что приводило к росту полуширины аппаратной функции.

В экспериментах использовались отпаянные Кг-Cl<sub>2</sub>-, Хе-Cl<sub>2</sub>-, Хе-Br<sub>2</sub>-, Хе-I<sub>2</sub>-эксилампы емкостного разряда, Кг-Cl<sub>2</sub>, Хе-Cl<sub>2</sub>-эксилампы барьерного и тлеющего разрядов. В работах [9, 12, 14] приведено описание конструкций использовавшихся эксиламп, а в таблице представлены их общие характеристики.

3. На рис. 1 приведены спектры излучения положительного столба разряда емкостных эксиламп для

условий, указанных в таблице. Спектральная полуширина наиболее интенсивного перехода В-Х-молекул КгCl\* ( $\lambda = 222$  нм), ХеCl\* ( $\lambda = 308$  нм), ХеBr\* ( $\lambda = 282$  нм) составляет соответственно ~ 4,5; 8; 7 нм. Характерным для спектров в данных условиях является, во-первых, наличие явно выраженных D-X- и C-A-переходов указанных молекул. Во-вторых, в случае ХеBr\*- и ХеCl\*-молекул наблюдается широкое и интенсивное синее крыло В-Х-перехода. В спектре Хе-I<sub>2</sub>-эксилампы при низком давлении (~ 1,5 торр) наиболее интенсивной оказалась атомная линия йода  $\lambda = 206$  нм (рис. 1, з). При этом интенсивность полосы В-Х-перехода молекулы ХеI\* ( $\lambda = 253$  нм) существенно более низка. По мере увеличения давления соотношение интенсивностей указанных линии и полосы изменяется, и при давлении ~ 10 торр они становятся соизмеримыми по амплитуде.

**Общие характеристики эксиламп емкостного, барьерного и тлеющего разрядов, для которых проводились исследования**

Характеристика	Тип разряда							
	емкостной				барьерный		тлеющий	
Рабочая смесь	Хе-Cl <sub>2</sub>	Кг-Cl <sub>2</sub>	Хе-Br <sub>2</sub>	Хе-I <sub>2</sub>	Хе-Cl <sub>2</sub>	Кг-Cl <sub>2</sub>	Хе-Cl <sub>2</sub>	Кг-Cl <sub>2</sub>
Давление рабочей смеси, торр	6	6	4,5	1,5	120	120	6-9	6-9
Межэлектродный зазор, см	20	20	20	50	0,8	0,8	20-80	20-80
Внешний диаметр трубки, см	3,8	4,2	4,2	3,5	6,5	6,5	1-6	1-6
Длина волны максимума спектрального распределения, $\lambda$ , нм	308	222	282	206	308	222	308	222

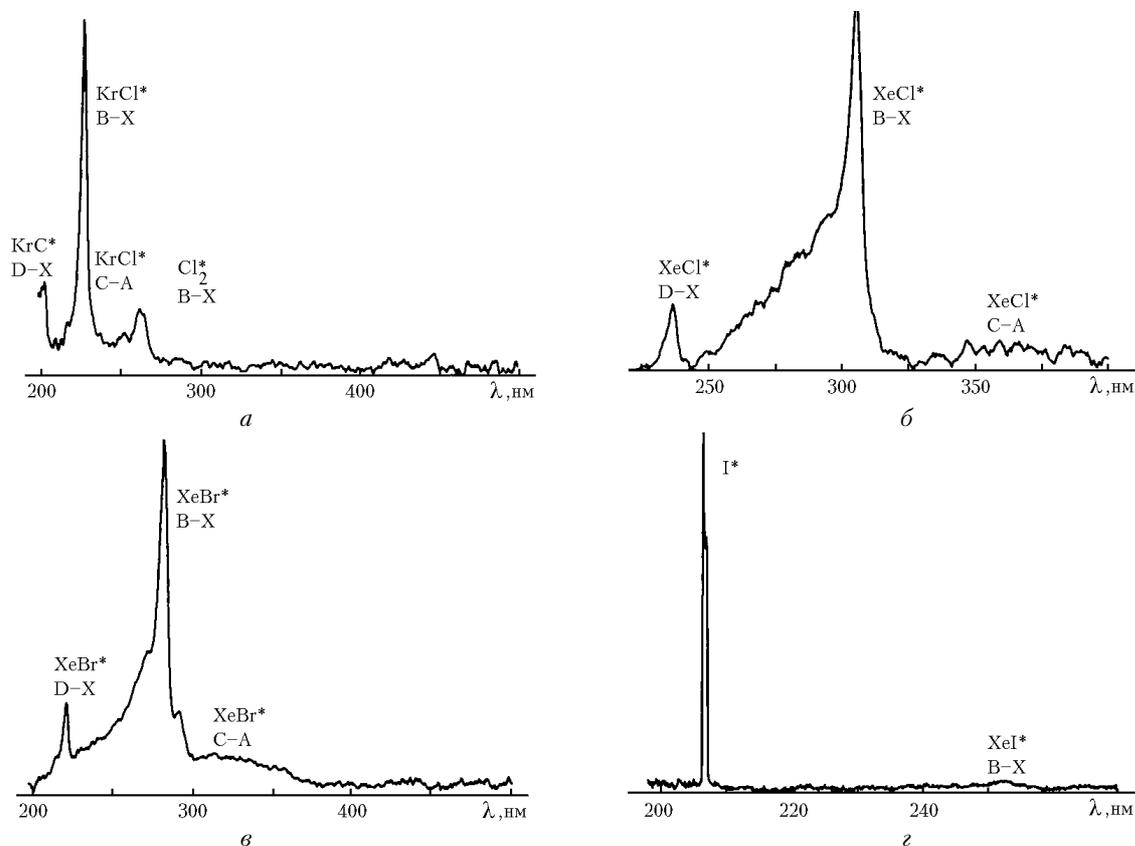


Рис. 1. Спектр излучения эксиламп емкостного разряда для смесей: Кг-Cl<sub>2</sub> при давлении 6 торр (а); Хе-Cl<sub>2</sub> при давлении 6 торр (б); Хе-Br<sub>2</sub> при давлении 4,4 торр (в); Хе-I<sub>2</sub> при давлении 1,5 торр (з)

На рис. 2 приведены спектры излучения Kr-Cl<sub>2</sub>, Xe-Cl<sub>2</sub>-эксиламп при возбуждении тлеющим разрядом. Сравнение рис. 1 и 2 позволяет заключить, что спектральное распределение излучения в обоих случаях практически одинаково. Это, по-видимому, является следствием того, что такие характеристики рабочей среды, как давление и состав смеси, приведенная напряженность электрического поля  $E/P$  ( $E$  – напряженность электрического поля,  $P$  – давление), эффективность оказываются близкими.

Характерной особенностью барьерного разряда является небольшой межэлектродный зазор, что позволяет использовать высокие давления рабочей среды. На рис. 3 представлены спектры излучения Kr-Cl<sub>2</sub>, Xe-Cl<sub>2</sub>-эксиламп при данном способе возбуждения. Основной особенностью, как видно из рисунка, является наличие в спектре лишь полос В-Х-переходов. Спектральная полуширина перехода В-Х молекулы KrCl\* составляет ~ 2 нм. Полосы D-X-, C-A-переходов молекулы KrCl\*, а также полоса молекулы

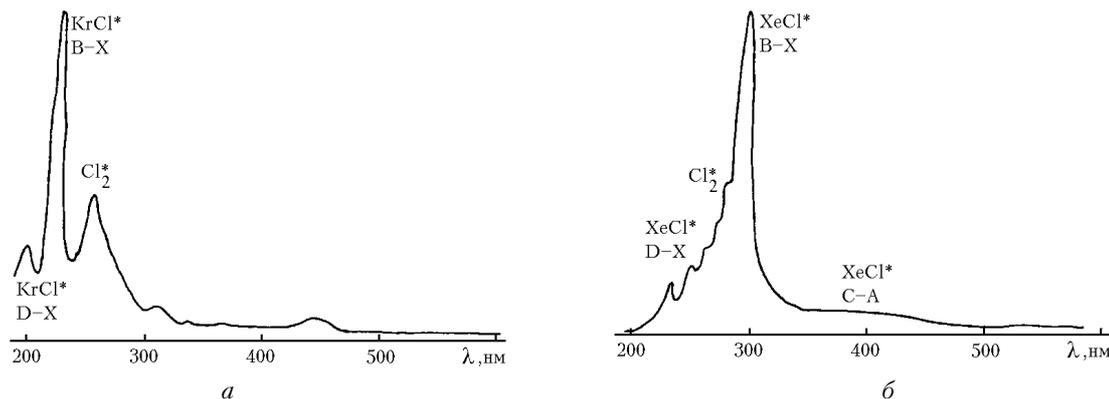


Рис. 2. Спектр излучения эксиламп тлеющего разряда для смесей: Kr-Cl<sub>2</sub> при давлении 6 торр (а); Xe-Cl<sub>2</sub> при давлении 6 торр (б)

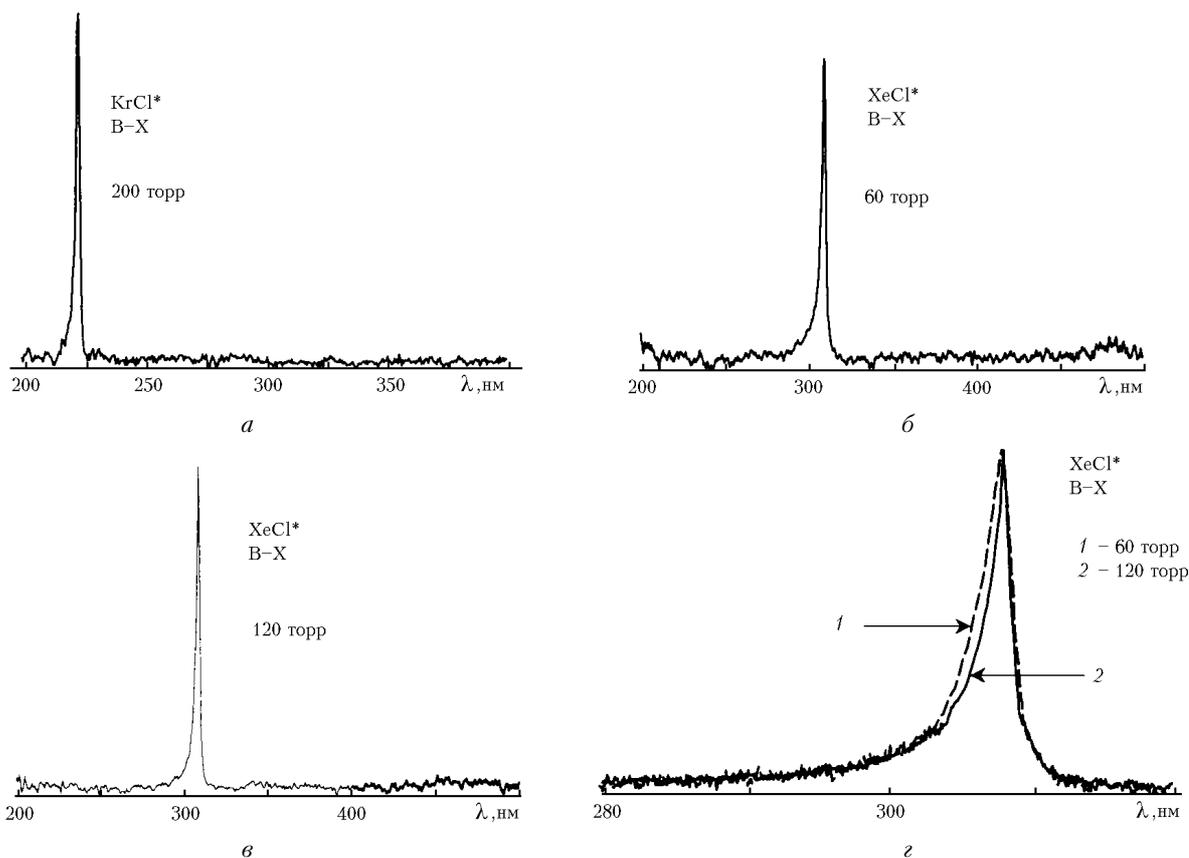


Рис. 3. Спектр излучения KrCl-эксилампы барьерного разряда при давлении смеси 200 торр (а); XeCl-эксилампы барьерного разряда при давлении смеси 60 и 120 торр (б-г)

$\text{Cl}_2^*$ , присутствовавшие в спектре излучения при возбуждении емкостным и тлеющим разрядами, в случае барьерного разряда практически отсутствуют. Рис. 3, б, в, г иллюстрирует влияние давления на полуширину В-Х-перехода молекулы  $\text{XeCl}^*$ . Так, при давлении 60 торр она составляет ~3,2 нм, а при давлении 120 торр ~1,8 нм. Уменьшение полуширины полосы излучения объясняется возрастанием скорости колебательной релаксации молекул при увеличении давления смеси [15].

Стабильность спектра излучения была проверена для отпаянных эксиламп емкостного разряда, ресурс которых составляет не менее 1000 ч [12, 16]. На рис. 4 приведены кривые спектрального распределения

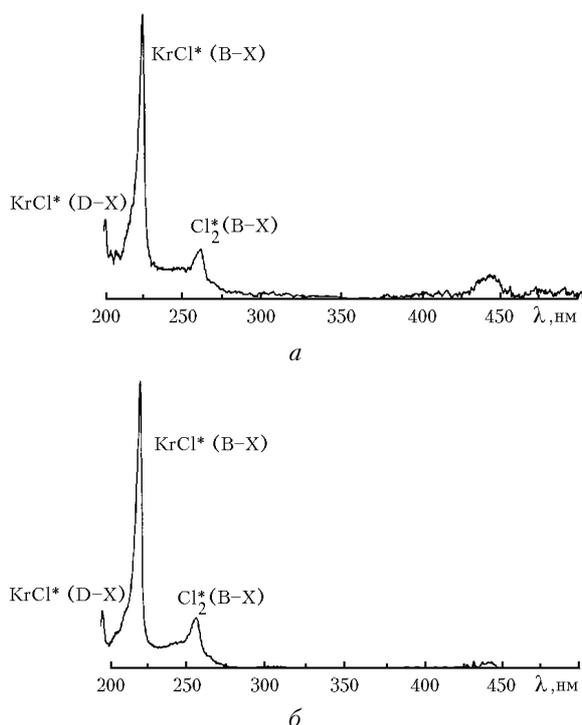


Рис. 4. Спектр  $\text{Kr-Cl}_2$ -эксилампы емкостного разряда при наработке 100 (а) и 625 ч (б)

$\text{Kr-Cl}_2$ -эксилампы в зависимости от наработки. Уменьшение выходной мощности при этом составляло не более 15%. Видно, что спектр излучения практически не изменился. При проведении дополнительных экспериментов по регистрации спектра в зависимости от продолжительности (времени) работы эксилампы было отмечено также уменьшение доли излучения Д-Х-, С-А-переходов.

4. В заключение отметим основные результаты работы.

Во-первых, в эмиссионном спектре эксиламп в диапазоне от 200 до 500 нм фиксируются лишь относительно узкие полосы эксиплексных молекул. Подбором рабочей смеси (и, соответственно, излучающей молекулы) можно обеспечить излучение в требуемом спектральном диапазоне.

Во-вторых, необходимо отметить идентичность спектра в эксилампах емкостного и тлеющего разрядов. При этом наблюдается излучение полос В-Х-, Д-Х-, С-А-переходов соответствующей эксиплексной молекулы, а также молекулы галогена. При возбуждении эксилампы барьерным разрядом спектр излучения включает лишь узкую В-Х-полосу с характерной шириной на полувывоте ~2-3 нм. В  $\text{Xe-I}_2$ -эксилампе спектр излучения зависит от давления смеси и состоит при низком давлении преимущественно из атомной линии йода, а при увеличении давления – из атомной линии йода и полосы молекулы  $\text{XeI}^*$ .

В-третьих, спектр излучения отпаянных эксиламп емкостного разряда остается практически неизменным в течение длительного срока функционирования лампы, сравнимого с величиной ресурса работы.

Авторы выражают благодарность В.Ф. Тарасенко за поддержку работы, Э.А. Соснину, М.В. Ерофееву и Д.В. Шитцу за предоставление эксиламп емкостного разряда и генераторов возбуждения.

Данная работа была поддержана МНТЦ (проект № 1270).

1. *Proc. of the 9th Int. Symp. on Science & Technology of Light Sources. LS-9. Cornell University, Ithaca, NY, USA, 2001.*
2. *Proc. of the 8th Int. Symp. on Science & Technology of Light Sources. LS-8. Greifswald, Germany, 1998.*
3. *Proc. of the 7th Int. Symp. on Science & Technology of Light Sources LS-7. Kyoto, Japan, 1995.*
4. Oda A., Sugawara H., Sakai Y., Akashi H. Estimation of the output power and efficiency of Xe barrier discharge excimer lamps using a one-dimensional fluid model for various voltage waveforms // *J. Phys. D.* 2000. V. 33. P. 1507-1513.
5. Mildren R.P., Carman R.J. Enhanced performance of a dielectric barrier discharge lamp using short-pulsed excitation // *J. Phys. D.* 2001. V. 34. P. L1-L6.
6. Xueji Xu. Dielectric barrier discharge – properties and applications // *Thin Solid Films.* 2001. V. 390. P. 237-242.
7. Zhang J.-Y., Boyd I.W. Lifetime investigation of excimer UV sources // *Appl. Surface Sci.* 2000. V. 168. P. 296-299.
8. Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W. From ozone generators to flat television screens : history and future potential of dielectric – barrier discharges // *Pure Appl. Chem.* 1999. V. 71. N. 10. P. 1819-1828.
9. Panchenko A.N., Sosnin E.A., Tarasenko V.F. Improvement of output parameters of glow discharge UV excilamps // *Opt. Commun.* 1999. V. 161. P. 49-252.
10. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. Цилиндрические эксилампы с накачкой тлеющим разрядом // *Ж. техн. физ.* 1998. Т. 68. № 2. С. 64-68.
11. Lomaev M.I., Panchenko A.N., Skakun V.S., Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Adomson M.G., Myers B.R., Wang F.T. Excilamp producing up to 130 W of output power and possibility of its applications // *Laser and Particle Beams.* 1997. V. 15. N. 2. P. 339-345.
12. Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Отпаянные эффективные эксилампы, возбуждаемые емкостным разрядом // *Письма в ЖТФ.* 1999. Т. 25. Вып. 21. С. 27-32.

13. *Panchenko A.N., Tarasenko V.F.* Radiation characteristics of subnormal glow discharge in mixtures of inert gases and halogens // *Optics and Spectroscopy*. 1998. V. 84. N 3. P. 337–339.
14. *Ломаев М.И., Панченко А.Н., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Мощные источники спонтанного ультрафиолетового излучения // *Изв. вузов. Физ.* 2000. № 5. С. 69–72.
15. *Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю.* Электроразрядные эксимерные лазеры. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
16. *Ерофеев М.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Чернов Е.Б.* Время жизни рабочих смесей ХеСl- и КrСl-эксилламп // *Оптика атмосф. и океана*. 2000. Т. 13. № 3. С. 312–315.

*A.A. Lisenko, M.I. Lomaev.* **Spectra of capacitive, glow, and barrier discharge excilamps based on Kr–Cl<sub>2</sub>, Xe–Cl<sub>2</sub>, Xe–Br<sub>2</sub>, Xe–I<sub>2</sub> mixtures.**

Spectra of Xe–Cl<sub>2</sub>, Xe–Br<sub>2</sub>, Xe–I<sub>2</sub> excilamps excited by capacitive, glow and barrier discharges are presented. Spectra of Xe–Cl<sub>2</sub> barrier discharge excilamp depending on gas mixture pressure (60 and 120 Torr) have been obtained and analyzed. Dependence of Kr–Cl<sub>2</sub> capacitive discharge excilamp spectrum on the operation time is presented.