

04; 07

## Эксплексная лампа на парогазовой смеси Kr–KCl

© М.С. Кленовский, Р.Б. Рийвес, В.А. Кельман, Ю.В. Жменяк, Ю.О. Шпеник

Институт электронной физики НАН Украины,  
88017 Ужгород, Украина  
e-mail: vkel@mail.uzhgorod.ua

(Поступило в Редакцию 30 июля 2008 г.)

Создан источник УФ-излучения (эксиллампа) на основе парогазовой смеси Kr–KCl, возбуждаемой в продольном высоковольтном импульсно-периодическом разряде. Изучен эмиссионный спектр и временные характеристики излучения разряда. Доминирующим в спектре излучения источника является переход  $B \rightarrow X$  эксимерной молекулы  $KrCl^*$  ( $\lambda = 222 \text{ nm}$ ). Исследованы зависимости импульсной мощности излучения лампы от различных параметров разряда, обсуждается механизм образования  $B$ -состояния эксимерной молекулы.

PACS: 42.72.Bj, 52.80.Yr

### Введение

К настоящему времени создано большое количество различных образцов эксилламп, преимущественно на двойных газовых смесях, которые излучают на переходах эксплексных молекул галогенидов инертных газов. Это обусловлено широкой сферой возможного научно-технического применения эксилламп, в частности, для инициирования фотохимических и фотофизических процессов, для разрушения вредных органических веществ, в медицинских целях, в биологии, экологии и других сферах.

Однако среди большого числа работ, посвященных исследованию излучения эксплексных молекул галогенидов инертных газов, лишь в нескольких из них [1–5] в качестве рабочих сред использовались двойные парогазовые смеси инертных газов и галогенидов щелочных металлов. Впервые такого рода смесь была использована в плазменном источнике излучения [1,2] при инъекции NaCl в сверхзвуковой поток плазмы. Была получена эффективная люминесценция на длине волны  $\lambda = 308 \text{ nm}$  на переходе эксплексной молекулы  $HeCl^*$ . Эти работы послужили стимулом для работы [3], в которой было выполнено численное моделирование эксплексной  $HeCl$ -лампы на смеси  $He$ –NaCl с накачкой жестким ионизатором пучкового типа, и показано, что при оптимальных условиях возбуждения КПД источника достигает 40%, а плотность излучаемой энергии  $0.025 \text{ J/l}$ .

Предложенная в работах [1–3] смесь была использована нами для создания эксилламп низкого давления на  $B \rightarrow X$ -переходе эксплексной молекулы  $HeCl^*$  ( $\lambda = 308 \text{ nm}$ ) с возбуждением в высоковольтном импульсно-периодическом разряде [4]. Для практического использования этот способ возбуждения, очевидно, имеет существенные преимущества как перед пучковым, так и перед плазменным способом. Средняя мощность и КПД излучателя составили 0.5 W и 0.2% соответственно.

Этот же метод возбуждения был использован в работе [5] для создания эксилламп на  $B \rightarrow X$ -переходе эксплексной молекулы  $HeCl^*$  на основе смеси  $He$ –KCl. Эмиссионные параметры лампы на основе смеси  $He$ –KCl по мощности излучения на порядок превышают параметры  $He$ –NaCl-источника.

В настоящей работе был расширен круг двойных парогазовых смесей, используемых для возбуждения излучения эксимерных молекул. Были исследованы эмиссионные характеристики излучения, работающего на парогазовой смеси Kr–KCl, возбуждаемой в продольном высоковольтном импульсно-периодическом разряде.

### Техника и методика эксперимента

Конструкция эксилламп и методика исследований эмиссионных свойств излучателя на парогазовой Kr–KCl-смеси идентичны использованным ранее в [4,5]. Экспериментальная эксиллампа содержит вакуумную герметичную газоразрядную трубку (ГРТ) из плавленого кварца, вдоль которого размещаются керамические кольца с внутренним диаметром 12 mm. Кольца ограничивают диаметр разряда, а в промежутках между ними помещен порошок хлорида калия. Коаксиальные медные электроды, вклеенные в противоположные торцы ГРТ, охлаждаются проточной водой. Длина межэлектродного промежутка составляет 40 cm. Необходимый температурный режим достигается одновременным использованием саморазогрева (т.е. энергии разряда) и внешней печи. Отметим, что давлению насыщенного пара KCl в 1–3 Torr, необходимому для нормальной работы источника, соответствует, согласно справочным данным [6], температура 1090–1150 K. Излучение из ГРТ выводится сквозь выходные окна, вынесенные из зоны нагрева.

Возбуждение активной среды в эксиллампе осуществлялось продольным высоковольтным импульсно-периодическим разрядом. Для возбуждения разряда использована схема с резонансным зарядом накопительной

емкости 1650 pF и дальнейшим ее разрядом через тиратрон ТГИ 1-2000/35 и ГРТ.

Исследование спектров излучения разряда и временных характеристик импульсного излучения проводилось при помощи системы регистрации, состоящей из монохроматора МДР-6, фотоприемника ФЭУ-106, самопишущего прибора Н 307/1 и осциллографа С1-99.

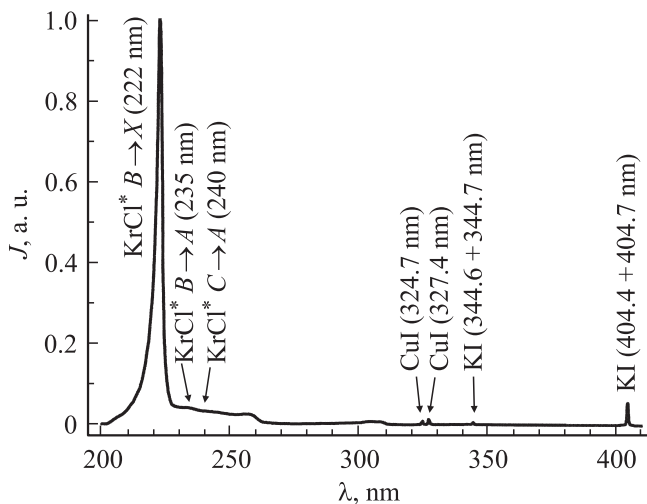
## Результаты исследований и обсуждение

Наиболее важным результатом выполненных исследований является то, что возбуждение Kr–KCl-смеси в продольном импульсно-периодическом разряде приводит к интенсивному УФ-излучению, максимум которого приходится на длину волны 222 nm.

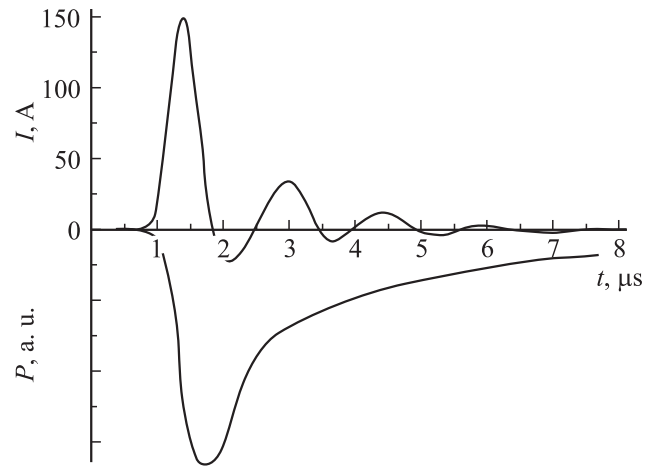
На рис. 1 приведен интегральный во времени эмиссионный спектр  $J(\lambda)$  эксилампы на смеси Kr–KCl, ограниченный спектральным диапазоном 200–410 nm. Спектр обработан с целью учета спектральной чувствительности регистрирующей системы.

Приведенный эмиссионный спектр источника характеризуется наличием доминирующего излучения  $B \rightarrow X$ -перехода эксиплексной молекулы  $\text{KrCl}^*$  с максимумом при  $\lambda = 222$  nm, в котором сконцентрирована преимущественная часть излучения газового разряда ( $\sim 75\%$ ).

Кроме того, в пределах рассматриваемого спектрального диапазона были зарегистрированы эмиссии  $B \rightarrow A$  (235 nm) и  $C \rightarrow A$  (240 nm) переходов эксиплексной молекулы  $\text{KrCl}^*$ . В нем также присутствуют линии резонансных переходов  $6p \rightarrow 4s$  (334.6 + 334.7 nm),  $5p \rightarrow 4s$  (404.4 + 404.7 nm) атомарного калия и линии резонансных переходов  $4p \rightarrow 4s$  (324.6 + 327.4 nm) атома меди. Наличие линий атомарного калия обусловлено химическим составом галогенонесителя (KCl), а появление в разряде атомов меди является следствием



**Рис. 1.** Интегрированный во времени эмиссионный спектр  $J(\lambda)$  эксилампы на смеси Kr–KCl.  $U_r = 5$  kV,  $I_r = 100$  mA,  $p(\text{Kr}) = 45$  Torr,  $f = 4$  kHz,  $T = 1130$  K.



**Рис. 2.** Временные формы импульсов тока  $I(t)$  и эмиссии  $P(t)$  эксиплексной молекулы  $\text{KrCl}^*$ .  $U_r = 6$  kV,  $f = 4$  kHz,  $p(\text{Kr}) = 40$  Torr,  $T = 1100$  K.

распыления медных электродов ионной бомбардировкой, а также газотранспортными реакциями в присутствии галогена. Отсутствие в спектре линий инертного газа обусловлено недостаточной температурой электронов в разряде при введении легкоионизируемой примеси, в частности, атомов металлов [4].

На рис. 2 приведены временные зависимости импульсов тока  $I(t)$  и импульсов мощности излучения  $P(t)$   $B \rightarrow X$ -перехода эксиплексной молекулы  $\text{KrCl}^*$ . Продолжительность токового импульса на полувысоте составляет  $\sim 500$  ns, а эмиссионного — более  $1.5$   $\mu$ s. Излучение эксиплексных молекул берет начало одновременно с развитием тока разряда в ГРТ и, хотя максимум мощности излучения достигается еще во время импульса тока, преимущественная часть энергии излучения приходится на послесвечение разряда.

Ширина полосы излучения  $B \rightarrow X$ -перехода эксиплексной молекулы  $\text{KrCl}^*$  на полувысоте составляет  $\sim 2.8$  nm и не изменяется в диапазоне изменения условий исследований. Структура эмиссионного спектра эксиплексной молекулы  $\text{KrCl}^*$  и характер распределения интенсивности внутри  $B \rightarrow X$ -полосы излучения (аналогично тому, как это было в работах [4,5] в случае излучения эксимерной молекулы  $\text{XeCl}^*$ , возбуждаемой в смесях Xe–NaCl, Xe–KCl) свидетельствуют о том, что эксиплексные молекулы образуются в разряде преимущественно в нижних колебательных состояниях  $B$ -терма в процессе бинарных реакций замещения атома калия в молекуле KCl возбужденными и ионизированными атомами криптона (см. таблицу), а не в процессе трехчастичной ион-ионной рекомбинации, требующего для эффективного протекания давления криптона  $\sim 200$  Torr и больше.

Приведенные в таблице для сравнения значения дефектов энергий реакций замещения для смеси Xe–NaCl взяты из [3], а для смесей Xe–KCl и Kr–KCl рассчитаны

Реакции замещения и соответствующие дефекты энергии

Реакция замещения	Дефекты энергии, eV
$\text{Xe}^+ + \text{NaCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Na}^+$	0.23
$\text{Xe}^* + \text{NaCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Na}$	1.70
$\text{Xe}^+ + \text{KCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{K}^+$	0.14
$\text{Xe}^* + \text{KCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{K}$	0.81
$\text{Kr}^+ + \text{KCl} \rightarrow \text{KrCl}^* + \text{K}^+$	0.45
$\text{Kr}^* + \text{KCl} \rightarrow \text{KrCl}^* + \text{K}$	0.82

аналогично работе [3]. Из сравнения дефектов энергий видно, что энергетические условия для процесса замещения атомов металла возбужденными атомами инертных газов в случае смеси Kr–KCl близки к таким же, как и для смеси Xe–Cl, и более благоприятны, нежели для смеси Xe–NaCl. Что касается реакции замещения атомов металла ионами инертных газов, то из трех смесей для Kr–KCl-смеси условия самые неблагоприятные.

К сожалению, определить среднюю мощность излучателя на основе парогазовой смеси Kr–KCl, аналогично тому, как это было сделано в [4,5] для смесей Xe–NaCl и Xe–KCl, нам не удалось вследствие отсутствия светофильтров, позволяющих отделить УФ-излучение в области 222 нм от излучения в ИК-области спектра. Однако нами оценена мощность излучения эксимерных молекул KrCl\* исходя из сравнения соотношений интенсивностей  $B \rightarrow X$ -переходов молекул XeCl\* и KrCl\*, возбуждаемых разрядом в смесях Xe–NaCl и Kr–KCl с интенсивностью атомарных линий натрия и калия в соответствующих спектрах. Поскольку соотношения этих значений интенсивности примерно одинаковы, то учитывая, что эффективные сечения возбужденных резонансных переходов атомов натрия и калия электронами близки, можно сделать вывод, что и средние мощности излучения молекул XeCl\* и KrCl\* одинаковы по порядку величины. Отметим, что значение средней мощности излучения на  $B \rightarrow X$ -переходе молекулы XeCl\*, возбуждаемой в смеси Xe–NaCl, определенное в работе [5], имеет значение  $P \sim 0.5$  Вт.

Важными факторами, влияющими на интенсивность УФ-излучения источника, являются параметры, определяющие условия эксперимента: температура ГРТ  $T$ , напряжение на выпрямителе  $U_r$ , давление инертного газа  $p(\text{Kr})$  и частота следования импульсов возбуждения  $f$ .

Результаты измерения зависимостей импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от указанных параметров приведены на рис. 3–6. Эти зависимости имеют в области изменения условий исследований экстремумы, что позволяет определить оптимальный режим работы эксилампы с параметрами: напряжение на выпрямителе  $U_r \sim 5\text{--}7$  кВ, давление криптона  $p(\text{Kr}) = 10$  Торр, частота повторения импульсов  $f = 3\text{--}4$  кГц, температура ГРТ  $T \sim 1140$  К.

На рис. 3 приведена зависимость повторения импульсной мощности  $P$  излучения эксилампы на смеси Kr–KCl

от температуры ГРТ. Присутствие температурного максимума зависимости при температуре  $\sim 1130\text{--}1150$  К и последующий спад мощности с ростом температуры обусловлены уменьшением эффективной температуры электронов и, следовательно, их способностью к эффективному возбуждению и ионизации атомов криптона.

Зависимость импульсной мощности  $P$  излучения от напряжения (см. рис. 4) характеризуется наличием насыщения при напряжении 6–8 кВ. Это обусловлено, по-видимому, увеличением накопления электронов к началу очередного импульса с ростом напряжения и, следовательно, увеличением крутизны импульса тока. При этом возрастает падение напряжения как реактивной составляющей импульса ГРТ, и уменьшается температура электронов.

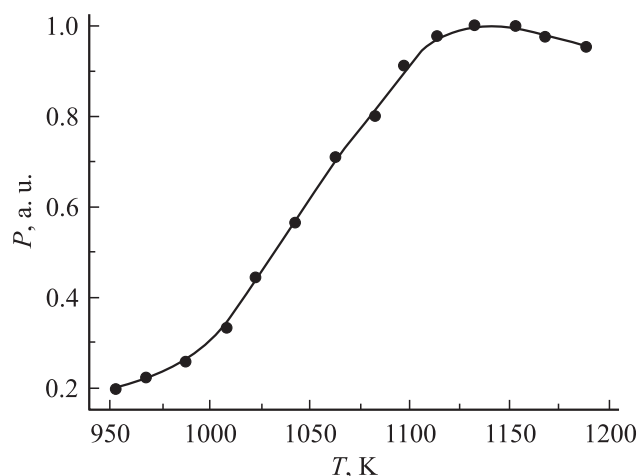


Рис. 3. Зависимость импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от температуры ГРТ  $T$ .  $U_r = 5$  кВ,  $I_r = 100$  мА,  $p(\text{Kr}) = 30$  Торр,  $f = 4$  кГц.

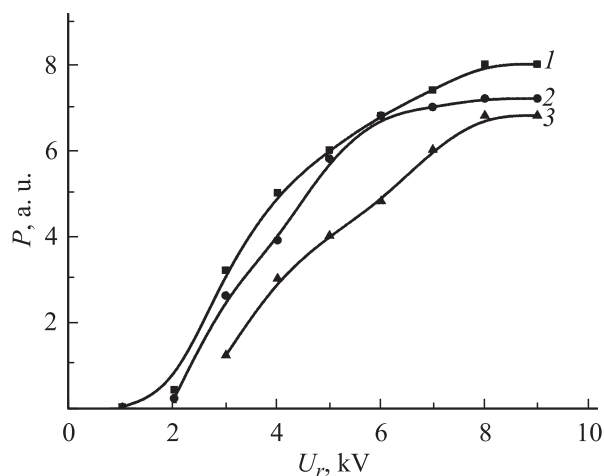
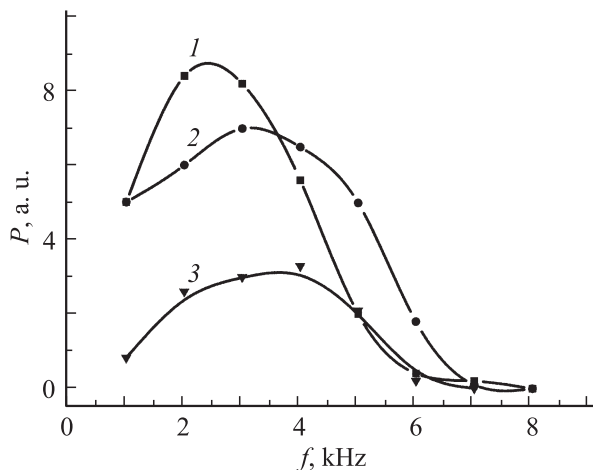
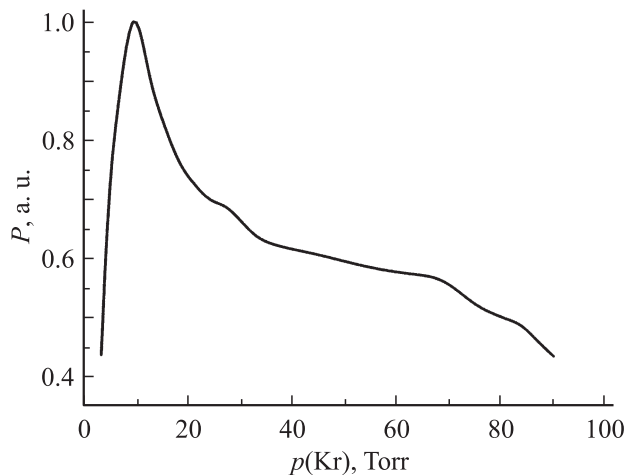


Рис. 4. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от напряжения на выпрямителе  $U_r$ . Частота следования импульсов возбуждения,  $f$ : 1 — 3, 2 — 4, 3 — 5 кГц.  $p(\text{Kr}) = 45$  Торр,  $T = 1100$  К.



**Рис. 5.** Зависимость импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от частоты  $f$ . Напряжение на выпрямителе,  $U_r$ : 1 — 6, 2 — 5, 3 — 3.5 kV.  $p(\text{Kr}) = 45$  Torr,  $T = 1100$  K.



**Рис. 6.** Зависимость импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от давления криптона  $p(\text{Kr}) = 45$  Torr.  $U_r = 5$  kV,  $I_r = 100$  mA,  $f = 4$  kHz,  $T = 1100$  K.

На рис. 5 приведены типовые зависимости пиковой импульсной мощности излучения источника  $P$  от частоты повторения импульсов возбуждения  $f$ . Характерным для этих зависимостей является наличие максимумов при частоте  $\sim 3\text{--}4$  kHz. Как и в предыдущем случае, наличие максимума и дальнейшее уменьшение мощности с ростом частоты по достижении максимума следует интерпретировать как влияние эффекта накопления предимпульсной концентрации электронов.

Зависимость импульсной мощности  $P$  эксилампы от давления криптона  $p(\text{Kr})$  представлена на рис. 6. Обращает на себя внимание тот факт, что зависимость достигает максимума при давлении  $p(\text{Kr}) \sim 10$  Torr, что существенно (в 2.5–4 раза) меньше оптимальных давлений инертного газа Хе в лампах на смесях Хе–NaCl и Хе–KCl.

Наличие максимума и последующий спад мощности с ростом давления обусловлены тем, что с увеличением давления возрастают концентрации исходных реагентов  $\text{Kr}^*$  и  $\text{Kr}^+$ , участвующих в реакциях замещения, что приводит к увеличению выхода эксимерных молекул. Дальнейшее увеличение давления криптона ведет к уменьшению температуры электронов и, следовательно, к уменьшению эффективности образования реагентов  $\text{Kr}^*$  и  $\text{Kr}^+$ .

## Выводы

Исследованы эмиссионные свойства эксимерного источника УФ-излучения на парогазовой смеси Kr–KCl, возбуждаемой в продольном высоковольтном импульсно-периодическом разряде. Доминирующей в спектре излучения лампы на смеси Kr–KCl является эмиссионная полоса  $B \rightarrow X$ -перехода эксиплексной молекулы  $\text{KrCl}^*$  ( $\lambda = 222$  nm), в которой сконцентрирована преимущественная часть излучения газового разряда ( $\sim 75\%$ ).

Сделан вывод, что ведущим механизмом образования эксиплексных молекул  $\text{KrCl}^*$  являются реакции замещения атома калия в молекуле KCl возбужденными или ионизированными атомами криптона.

## Список литературы

- [1] Алехин А.А., Баринев В.А., Герасько Ю.В. и др. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 2. С. 43–51.
- [2] Алехин А.А., Баринев В.А., Герасько Ю.В. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 9–20.
- [3] Бойченко А.М. // Квант. электрон. 1999. Т. 20. № 2. С. 163–167.
- [4] Рийвес Р.Б., Светличный Е.А., Жменяк Ю.В. и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 10. С. 90–93.
- [5] Рийвес Р.Б., Жменяк Ю.В., Кельман В.А., Шпеник Ю.О. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 10. С. 102–105.
- [6] Таблица физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.