

03;04;07;12

## Эксилампа на смеси Хе–КCl

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

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

(Поступило в Редакцию 31 января 2006 г.)

Создан источник УФ-излучения на  $B \rightarrow X$ -переходе эксиплексной молекулы ХеCl на основе парогазовой смеси Хе–КCl. Исследованы эмиссионные свойства эксилампы: мощность, спектральный состав, временные характеристики. Найдены оптимальные условия возбуждения излучения эксилампы высоковольтным импульсно-периодическим разрядом. Средняя мощность и КПД лампы на порядок превышают соответствующие параметры для лампы на смеси Хе–NaCl. Все сравнительные характеристики двух типов излучателей объяснены на основе анализа эффективности реакций накачки эксиламп.

PACS: 42.55.Lt; 42.72.Bj

### Введение

Ранее в работе [1] нами сообщалось о создании эксилампы на  $B \rightarrow X$ -переходе эксиплексной молекулы ХеCl (максимум 308 nm) на основе парогазовой смеси Хе–NaCl. Возбуждение эксилампы осуществлялось продольным высоковольтным импульсно-периодическим разрядом. Средняя мощность и КПД излучателя составили около 0.5 W и 0.2%. В настоящей работе расширен круг нетоксичных веществ, используемых в качестве доноров галогена. В частности, в качестве такого галогеноносителя в эксилампе использовался хлорид калия, замена оказалась весьма удачной. Эмиссионные параметры лампы на основе парогазовой Хе–КCl-смеси по мощности излучения превышены на порядок в сравнении с Хе–NaCl-излучателем. Это приближает лампу к удельным характеристикам газовых эксиламп с накачкой тлеющим разрядом. Напомним, что впервые подобного рода смеси были использованы в плазменных источниках излучения [2,3], а в работе [4] сделаны теоретические оценки эффективности накачки эксилампы на основе смеси Хе–NaCl жестким ионизатором. Именно они в наибольшей мере стимулировали постановку наших исследований.

### Техника и методика эксперимента

Конструкция эксилампы и методика исследований эмиссионных свойств излучателя на смеси Хе–КCl идентичны использованному ранее в [1].

Газоразрядная трубка (ГРТ) эксимерной лампы изготовлена из плавленого кварца. Разряд ограничен расставленными вдоль трубки керамическими кольцами с внутренним диаметром 1.2 см, в промежутках между которыми расставлен порошок хлорида калия, длина межэлектродного пространства — 40 см. Для достижения рабочих температур использовался одновременно саморазогрев и внешняя печь. Согласно данным работы [5],

давлению насыщенного пара КCl  $\sim 1$  Torr, необходимого для работы лампы, соответствует температура  $\sim 1090$  K.

Возбуждение активной среды в эксилампе осуществлялось продольным импульсно-периодическим разрядом. Импульсным источником служила схема с применением накопительной емкости  $\sim 1650$  pF и тиратрона ТГИ1-2000/35 в качестве коммутатора.

Система регистрации состояла из монохроматора МДР-6, фотоприемника ФЭУ-106, измерителя мощности ИМО-2Н и осциллографа С1-99.

### Результаты исследований и обсуждение

В интегральном во времени спектре излучения смеси Хе–КCl (рис. 1, здесь и далее условия измерений наведены на рисунке), который ограничен спектральным участком 200–400 nm, доминирует по интенсивности излучение  $B \rightarrow X$ -перехода эксиплексной молекулы ХеCl\* с максимумом интенсивности вблизи 308 nm, как это уже наблюдалось и для Хе–NaCl-смеси [1]. Кроме того,

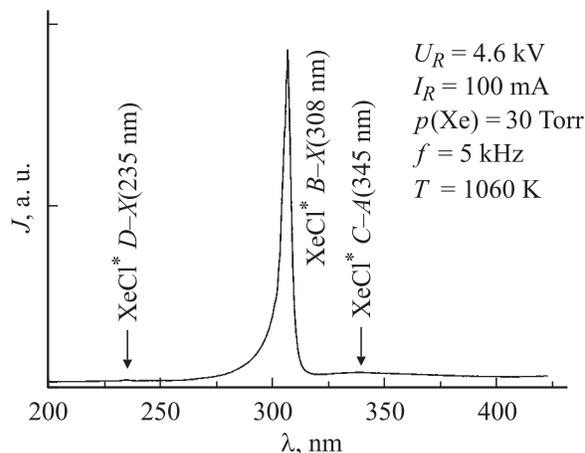


Рис. 1. Интегрированный во времени эмиссионный спектр  $J(\lambda)$  эксилампы на смеси Хе–КCl.

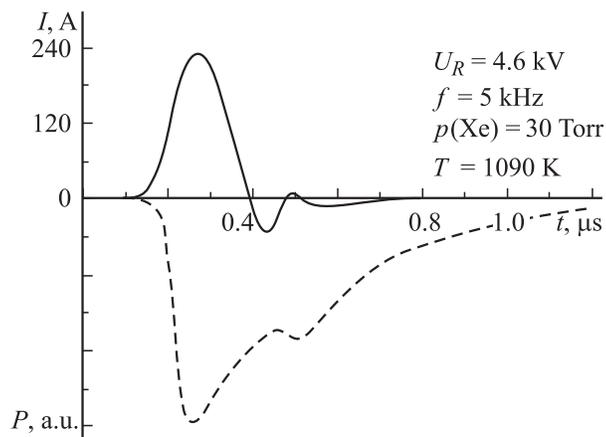


Рис. 2. Временные формы импульсов тока  $I(t)$  и эксимерной эмиссии  $P(t)$ .

зарегистрированы полосы  $D \rightarrow X$  ( $\sim 235$  nm) и  $C \rightarrow A$  ( $\sim 345$  nm) переходов эксиплексной молекулы  $\text{XeCl}^*$ . Отсутствие резонансных спектральных линий меди (как это имело место в [1]) обусловлено слабым распылением медных электродов при меньших значениях напряжения на фоне значительно возросшей интенсивности основной компоненты спектра. Полуширина спектральной полосы составляет, как и в случае Хе–NaCl-лампы,  $\sim 5$  nm и остается неизменной в диапазоне изменения условий исследований. Но в отличие от Хе–NaCl-излучателя протяженность спектра в коротковолновую область уменьшена в несколько раз. Это свойство может быть ценным для селективного влияния излучения эксилампы.

На рис. 2 приведены временные формы импульсов тока  $I(t)$  и мощности излучения  $P(t)$  эксиплексной молекулы  $\text{XeCl}^*$ . Продолжительность токового импульса по основанию составляет  $\sim 200$  ns, а эмиссионного — менее  $1 \mu\text{s}$ . Излучение эксиплексных молекул берет начало одновременно с развитием тока в ГРТ и преобладающая часть энергии излучения приходит на импульс тока разряда.

Структура эмиссионного спектра эксилампы свидетельствует о том, что молекулы  $\text{XeCl}^*$  генерируются в разряде преимущественно в нижних колебательных состояниях  $B$ -герма за счет бинарных реакций замещения (табл. 1). Следует отметить, что дефекты энергий реакций (для смеси Хе–NaCl взяты из [4], для Хе–KCl

Таблица 1. Реакция замещения и соответствующие дефекты энергий

Реакция замещения	Дефекты энергии, eV
$\text{Xe}^+ + \text{NaCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Na}^+$	0.23
$\text{Xe}^* + \text{NaCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{Na}$	1.7
$\text{Xe}^+ + \text{KCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{K}^+$	0.14
$\text{Xe}^* + \text{KCl} \rightarrow \text{XeCl}^* + \text{K}$	0.81

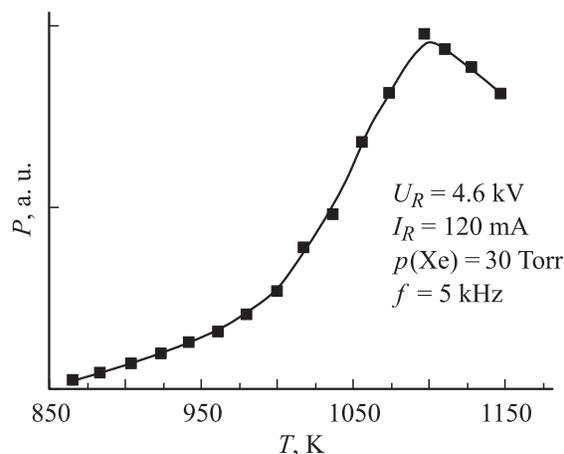


Рис. 3. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от температуры ГРТ.

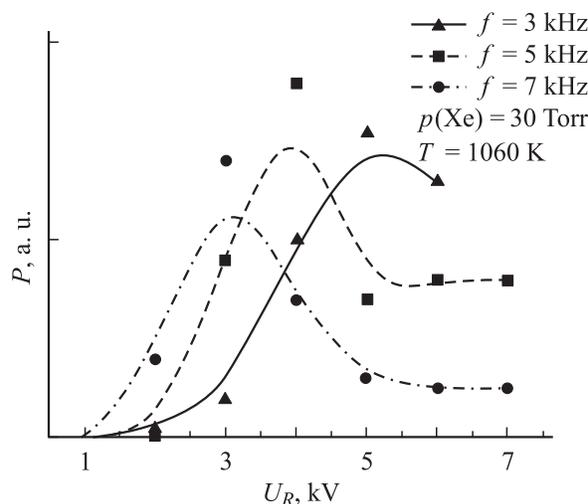


Рис. 4. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от напряжения на выпрямителе.

рассчитаны аналогично тому, как это было сделано в [4]) более благоприятны в случае смеси Хе–KCl, чем Хе–NaCl. Поэтому константы скоростей реакций (3) и (4) могут значительно превышать соответствующие константы для реакций (1) и (2).

На рис. 3 приведена зависимость импульсной мощности  $P$  эксилампы от температуры ГРТ  $T$ . Присутствие температурного максимума при 1100 K и последующий спад с ростом температуры объясняются уменьшением эффективной температуры электронов, и следовательно, их ионизационной способности.

Что касается зависимостей импульсной мощности  $P$  от напряжения на выпрямителе  $U_R$  (рис. 4), то наличие максимумов и последующего спада с ростом напряжения представляется весьма неожиданным, поскольку с ростом напряжения и соответствующим ростом температуры электронов, их ионизационная способность должна была бы увеличиться. Поэтому следует предположить

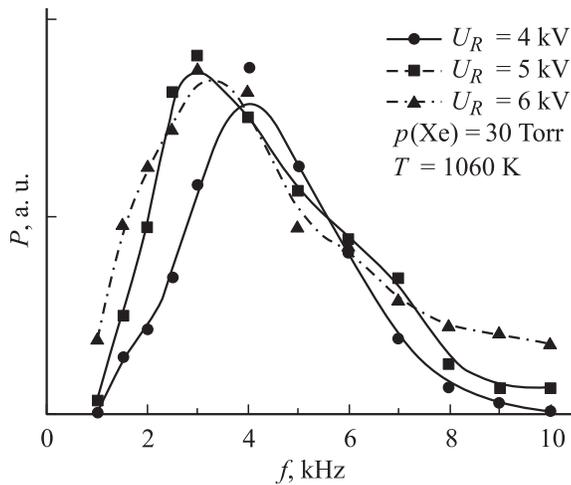


Рис. 5. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от частоты.

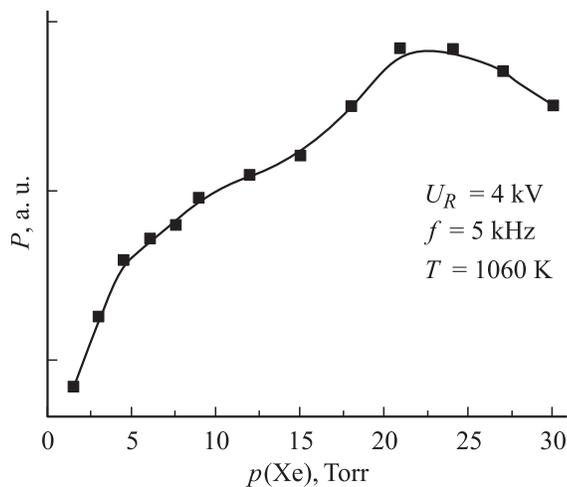


Рис. 6. Зависимость пиковой импульсной мощности излучения  $P$  эксилампы от давления ксенона.

существенную роль процессов накопления, а именно: с увеличением напряжения к началу следующего импульса возбуждения в плазме эксилампы остается очень высокая концентрация электронов, а это вновь ведет к уменьшению средней энергии электронов.

На рис. 5 иллюстрируются типовые зависимости импульсной мощности источника  $P$  от частоты повторения импульсов возбуждения  $f$ . Как и в предыдущих случаях, присутствие максимума и дальнейшего уменьшения мощности с ростом частоты можно пояснить влиянием эффекта накопления предимпульсной концентрации электронов. Важно отметить, что все зависимости на рис. 4 и 5 в этом случае взаимосогласованы, т. е. максимумы на зависимостях рис. 4 смещаются влево с ростом частоты, а на рис. 5 — смещаются влево с ростом напряжения на выпрямителе.

На рис. 6 представлена зависимость импульсной мощности лампы  $P$  от давления ксенона  $p(\text{Xe})$ . Наличие максимума и последующий спад с ростом давления — результат взаимодействия следующих факторов. Увеличение давления ведет к росту концентрации исходных реагентов  $\text{Xe}^+$  и  $\text{Xe}^*$  для реакций замещения (левая часть зависимости), а дальнейшее увеличение давления ксенона ведет к уменьшению температуры электронов (падающая правая часть зависимости).

Из представленных выше зависимостей была определена факторная точка максимального выхода УФ-излучения с внешними параметрами: частота повторения импульсов  $f = 4 \text{ kHz}$ , напряжение на выпрямителе  $U_R = 6 \text{ kV}$ , давление ксенона  $p(\text{Xe}) = 21 \text{ Torr}$  и температура ГРТ  $T = 1080 \text{ K}$ .

Определение средней мощности эксимерной эмиссии лампы на основе парогазовой смеси  $\text{Xe}-\text{KCl}$  было выполнено способом, аналогичным [1]. Расчет проводился с учетом геометрического фактора при упомянутых оптимальных условиях работы лампы с возбуждением высоковольтным импульсно-периодическим разрядом.

В табл. 2 приведены геометрические размеры ГРТ, измеренные и рассчитанные энергетические параметры  $\text{Xe}-\text{KCl}$ - и  $\text{Xe}-\text{NaCl}$ -ламп.

Как видно из таблицы, средняя мощность в КПД лампы на смеси  $\text{Xe}-\text{KCl}$  более, нежели на порядок, превышает соответствующие показатели для излучателя на смеси  $\text{Xe}-\text{NaCl}$ . Полагаем, что это также обусловлено более высокой эффективностью реакций замещения калия, нежели натрия, в молекулах их хлоридов возбужденным или ионизированным ксеноном в соответствии с различающимися дефектами энергии.

В будущем целесообразно продолжить изучение предложенных эксиламп в коротковолновой области спектра за счет использования других инертных газов (аргона и криптона) и других доноров галогена, к примеру, фторидов щелочных металлов.

Таблица 2. Сравнительные характеристики эмиссионных параметров эксиламп на основе смесей  $\text{Xe}-\text{NaCl}$  и  $\text{Xe}-\text{KCl}$

Параметр	Эксилампа	
	$\text{Xe}-\text{NaCl}$	$\text{Xe}-\text{KCl}$
$L$ , cm	40	
$d$ , cm	1.2	
$S$ , cm <sup>2</sup>	1	
$\bar{P}$ , W	$40 \cdot 10^{-6}$	$700 \cdot 10^{-6}$
$P_e$ , W	250	700
$P_e$ , W	0.461	8.272
КПД, %	0.18	1.182

Примечание.  $L$  — длина ГРТ;  $d$  — внутренний диаметр;  $S$  — площадь выходного окна;  $\bar{P}$  — средняя регистрируемая мощность эмиссии через выходное окно;  $P_e$  — электрическая мощность, вводимая в разряд;  $P$  — рассчитанная средняя мощность эмиссии сквозь всю поверхность ГРТ.

## Выводы

Продолжено изучение некогерентных источников УФ-излучения (эксилламп) на смеси ксенона с нетоксичными галогенонесителями. Исследованы спектральные и энергетические характеристики излучения Хе–КСl-лампы в высоковольтном импульсно-периодическом разряде. Доминирующим в спектре излучения лампы на смеси Хе–КСl является  $B \rightarrow X$ -переход эксиплексной молекулы ХеСl\* (308 nm). Показано, что ведущим механизмом накачивания  $B$ -состояния эксиплексной молекулы являются реакции замещения атома щелочного металла возбужденными или же ионизированными атомами ксенона. Средняя мощность и КПД лампы на смеси Хе–КСl составляют 8.3 W и 1.2%, что на порядок превышает соответствующие показатели для Хе–NaСl-лампы. Это согласуется с высшей эффективностью реакций замещения ксеноном для хлорида калия из-за меньших дефектов энергий.

## Список литературы

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