

М.И. Ломаев, А.С. Полякевич, В.Ф. Тарасенко

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ СМЕСИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ МОЛЕКУЛ ХеСl\* ПРИ НАКАЧКЕ ПРОДОЛЬНОМ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ

Приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию малых давлений смеси Хе–Cl<sub>2</sub> на эффективность излучения молекул ХеСl\* при накачке продольным тлеющим разрядом. Показано, что в области давления 0,5–2 мм рт. ст. сохраняются высокие кпд излучения молекул ХеСl\*, ~ 10%, максимальные эффективности излучения достигаются при мощности накачки ~ 7·10<sup>-18</sup> Вт на молекулу, а полуширина полосы излучения монотонно увеличивается при уменьшении давления, достигая ~ 12 нм при давлении 1 мм рт.ст. Анализируются процессы, ответственные за образование молекул ХеСl\*.

1. В последние годы значительное внимание стало уделяться созданию источников мощного УФ- и ВУФ-излучения – эксиламп [1–5], в которых используется излучение эксимерных и эксиплексных молекул при накачке различными типами разрядов инертных газов и смесей инертных газов с галогенидами. Рабочие давления в эксилампах обычно составляли от ~ 0,1 до нескольких атмосфер, т.к. эти давления соответствовали достижению либо максимальных мощностей, либо эффективностей излучения. В [2, 3] было показано, что при накачке стационарным тлеющим разрядом смесей Хе(Кг)–Cl<sub>2</sub> при давлениях ~10–20 мм рт. ст. реализуются высокие эффективности спонтанного излучения молекул ХеСl\* и КгСl\* (~10%). В [4, 5] при уменьшении давления смеси до ~5 мм рт. ст. была получена эффективность излучения молекул ХеСl\* также ~ 10%, а КгСl\* до ~ 14%.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию малых давлений смеси Хе–Cl<sub>2</sub> на эффективность излучения эксиплексных молекул ХеСl\* и на полуширину полосы излучения данной молекулы при накачке тлеющим разрядом.

2. Экспериментальная установка и методики были подобны описанным в [4, 5]. Излучатель эксилампы состоял из двух коаксиально расположенных трубок из кварцевого стекла высокого качества и двух электродов, установленных по торцам. Длина межэлектродного зазора равнялась 40 см, зазор между трубками составлял 3,5 мм при внешнем диаметре разрядной области, имеющей трубчатую форму, 50 мм. Внутренняя кварцевая трубка и катод охлаждались проточной водой. Эксилампа подключалась к источнику питания, с помощью которого можно было плавно изменять начальное напряжение от 1 до 30 кВ и ток разряда от 1 до 50 мА. Напряжение зажигания разряда зависело от давления и состава смеси и, как правило, не превышало 10 кВ. опыты производились в режиме нормального тлеющего разряда, при этом напряжение на электродах разрядного промежутка составляло 2–4 кВ, разрядный ток изменялся от 5 до 50 мА и мощность накачки от 5 до 300 Вт. Рабочая смесь Хе:Cl<sub>2</sub> = 3:1, которая была определена во время предварительных экспериментов [4, 5], готовилась в смесителе и периодически напускалась в излучатель. Время проведения отдельных опытов было меньше времени заметной деградации одной порции смеси.

Для определения мощности излучения эксилампы измерялся световой поток с единицы ее длины. При этом излучающая площадка считалась точечным источником света, т.к. фотодиод был удален от излучающей области на расстояние, в 10 раз превышающее ее поперечный размер. Фотодиод ФЭК-22СПУ калибровался излучением ХеСl-лазера. Для выделения ультрафиолетовой области использовался светофильтр. Спектры излучения эксилампы регистрировались монохроматором МДР-23 с решеткой 1200 штрихов на 1 мм и фотоумножителем ФЭУ-100, сигнал с которого через усилитель подавался на графопостроитель.

3. Основные результаты проведенных исследований представлены на рис. 1 и 2. При уменьшении давления от 6 до 1 мм рт. ст. наблюдается некоторое увеличение эффективности

излучения молекул  $\text{XeCl}^*$  (на  $\sim 30\%$ ) и увеличение полуширины полосы излучения (на  $\sim 15\%$ ). Максимальные КПД реализуются при давлениях 1–2 мм рт. ст. Уменьшение давления до 0,5 мм рт. ст. дало снижение эффективности излучения только на  $\sim 10\%$ , и лишь дальнейшее уменьшение давления приводило к заметному снижению мощности излучения и КПД (кривые 1 и 2 на рис. 1). Анализ влияния мощности накачки на КПД при малых давлениях смеси (рис. 1) показывает, что максимальные эффективности в области давлений 0,5–2 мм рт. ст. достигаются при удельной мощности накачки  $\sim 0,3 \text{ Вт}/(\text{см}^3 \cdot \text{мм рт. ст.})$  или при удельной мощности накачки на одну частицу рабочей смеси  $\sim 7 \cdot 10^{-18} \text{ Вт}$  на частицу.

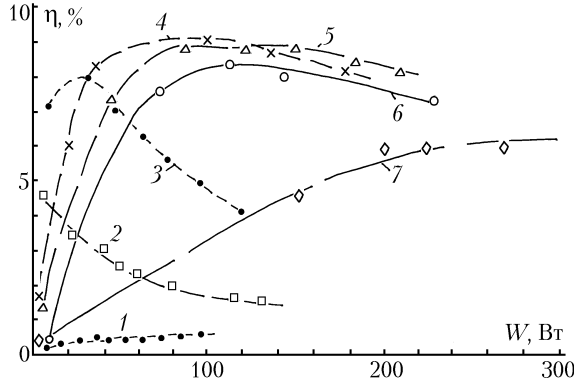


Рис. 1. Зависимость эффективности излучения молекул  $\text{XeCl}^*$  от мощности накачки для смеси  $\text{Xe}:\text{Cl}_2 = 3:1$  при давлениях  $< 0,25; 0,25; 0,5; 1; 2; 4$  и  $6 \text{ мм рт. ст.}$

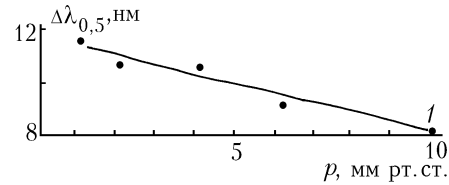


Рис. 2. Зависимость полуширины полосы спонтанного излучения молекул  $\text{XeCl}^*$  от давления смеси  $\text{Xe}:\text{Cl}_2 = 3:1$ . Точка 1 получена для смеси  $\text{Xe}:\text{HCl} = 3:1$

Известной особенностью разрядов при сравнительно малых давлениях является их однородность, что и наблюдалось в проведенных экспериментах. Разряд при давлениях 0,5–1 мм рт. ст. охватывал весь объем эксилампы и был весьма однородным за исключением прикатодной и прианодной областей.

4. Проведем анализ основных процессов, ответственных за образование молекул  $\text{XeCl}^*$ . Будем считать, что образование молекул  $\text{XeCl}^*$  происходит за счет двух процессов: гарпунной реакции и ион-ионной рекомбинации, а их гибель наступает в результате спонтанного распада и процессов тушения в объеме. Влиянием стенок для простоты расчетов будем пренебрегать. Нарботка возбужденных атомов ксенона  $\text{Xe}^*$ , участвующих в гарпунной реакции, осуществляется при столкновениях атомов ксенона с электронами (пеннинговская ионизация). Ионы ксенона образуются за счет процесса ступенчатой ионизации и при взаимодействии двух возбужденных атомов ксенона. Отрицательные ионы  $\text{Cl}^-$  образуются при диссоциативном прилипании электронов к  $\text{Cl}_2$  и разрушаются в обратном процессе. Фотоотлипание не будем учитывать из-за его небольшой роли, а также ради простоты кинетической модели. Так как степень ионизации рассматриваемой плазмы составляет  $10^{-5}$ – $10^{-6}$ , то концентрации исходных компонентов газовой смеси можно считать постоянными. Таким образом, для стационарного случая кинетическая модель будет представлять собой систему 5 нелинейных алгебраических уравнений:

$$d/dt [\text{XeCl}^*] = -[\text{XeCl}^*] A_1 + [\text{Xe}^*] [\text{Cl}_2] k_1 + [\text{Xe}^+] [\text{Cl}^-] k_2 - \sum_i [\text{XeCl}^*] N_i k_i = 0; \quad (1)$$

$$d/dt [\text{Xe}^*] = [\text{Xe}] n_e k_3 - [\text{Xe}^*] [\text{Cl}_2] k_1 - [\text{Xe}^*] n_e k_4 - [\text{Xe}^*]^2 k_5 - [\text{Xe}^*] A_2 = 0; \quad (2)$$

$$d/dt [\text{Xe}^+] = [\text{Xe}^*] n_e k_4 - [\text{Xe}^+] [\text{Cl}^-] k_2 + [\text{Xe}^*]^2 k_5; \quad (3)$$

$$d/dt [\text{Cl}^-] = [\text{Cl}_2] n_e k_6 - [\text{Xe}^+] [\text{Cl}^-] k_2 - [\text{Cl}^-] n_e k_7; \quad (4)$$

$$n_e + [\text{Cl}^-] = [\text{Xe}^+], \quad (5)$$

где  $k_1, k_2, k_i, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$  – константы, соответственно, гарпунной реакции, ион-ионной рекомбинации, тушения различными частицами, возбуждения, пеннинговской ионизации, прилипания, отлипания при столкновениях с электронами;  $A_1, A_2$  – вероятности спонтанного распада

пада, соответственно, молекул  $\text{XeCl}^*$  и атомов  $\text{Xe}^*$ ;  $N_i$  – концентрация электронов, атомов ксенона и молекул  $\text{Cl}_2$ . Последнее уравнение, представляющее собой условие электронейтральности, отбросим. Концентрацию электронов возьмем  $\sim 10^{11}$  [5].

Расчеты, выполненные по данной модели с использованием констант, приведенных в [6–11], позволяют сделать следующие заключения.

а) Основным каналом образования молекул  $\text{XeCl}^*$  служит в этих условиях гарпунная реакция. Вклад ион-ионной рекомбинации не превышает нескольких процентов. Это позволяет существенно упростить математическую модель и в дальнейших расчетах решать всего два первых уравнения вместо четырех. Отметим, что об основном вкладе гарпунной реакции в образование эксиплексных молекул в смесях с  $\text{Cl}_2$  сообщалось в [2–5].

б) Заметное влияние на эффективность образования молекул  $\text{XeCl}^*$  оказывает энергия электронов, от которой сильно зависит константа возбуждения ксенона, причем соотношение скоростей двух указанных выше каналов образования эксиплексных молекул в условиях нашего эксперимента существенно не изменяется при изменении константы возбуждения.

в) Из объемных процессов тушения молекул  $\text{XeCl}^*$  можно выделить только один – тушение эксиплекса молекулами галогена. Его доля составляет 5–10%.

5. Таким образом, проведенные исследования эффективности излучения молекул  $\text{XeCl}^*$  при накачке тлеющим разрядом и пониженных давлениях показали, что в области давлений 0,5–2 мм рт. ст. сохраняются высокие КПД излучения молекул  $\text{XeCl}^*$  ( $\sim 10\%$ ), а полуширина полосы излучения монотонно увеличивается при уменьшении давления, достигая  $\sim 12$  нм при давлении 1 мм рт. ст. Максимальные эффективности при давлениях 0,5–2 мм рт. ст. реализуются при мощности накачки, равной примерно  $7 \cdot 10^{-18}$  Вт на частицу. Можно предположить, что эффективность излучения и других эксиплексных молекул галогенидов инертных газов остается весьма высокой при пониженных давлениях рабочей смеси, а использование низких давлений ( $\sim 1$  мм рт. ст.) найдет практическое применение в эксилампах с накачкой тлеющим разрядом, т.к. при таких давлениях легко реализовать однородный разряд в трубках различных размеров и конструкций.

1. Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20. № 1. С. 7–9.
2. Головинский А.П. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 73–76.
3. Головинский А.П., Кан В.С. // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 75. Вып. 3. С. 604–609.
4. Панченко А.Н., Соснин Э.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Ломаев М.И. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 21. С. 47–51.
5. Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 2. С. 199–206.
6. Райзер Ю.П. // Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 592 с.
7. Куклин А.Е., Хапов Ю.И. Константы скоростей реакций образования и тушения эксиплексных молекул. Новосибирск, 1986. 23 с. (Препринт / Ин-т автоматики и электрометрии СО АН, № 301).
8. Багинский В.М., Владимиров В.В., Головинский П.М., Щедрин А.И. Оптимизация и устойчивость разряда в эксимерных лазерах на смеси He-Xe-HCl. Киев, 1988. 37 с. (Препринт / Ин-т физики АН УССР, № 2).
9. Кулагин В.Д. Кинетические процессы в плазме эксимерных лазеров: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., Ин-т атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1980. 11 с.
10. Бойченко А.М., Держиев В.И., Жидков А.Г., Карелин А.В., Коваль А.В., Середа О.В. // Кинетические проблемы некоторых плазменных лазеров, накачиваемых жестким ионизатором. М., Труды ИОФ АН, 1989. Т. 21. С. 44–115.
11. Смирнов Б.М. Отрицательные ионы. М.: Атомиздат, 1978. 174 с.

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
20 октября 1995 г.

**M.I. Lomaev, A.S. Polyakevich, V.F. Tarasenko. The Influence of Mixture Pressure on  $\text{XeCl}^*$  Molecules Radiation Efficiency under Pumping by the Longitudinal Glow Discharge.**

The results of experiments on study of Xe- $\text{Cl}_2$  mixture low pressure influence on the radiation efficiency of  $\text{XeCl}^*$  molecules under pumping by the longitudinal glow discharge are presented. The high efficiency of  $\text{XeCl}^*$  molecules radiation  $\sim 10\%$  is kept constant in pressure region of 0,5–2 Torr. The efficiency peaks are reachable at the pumping power of  $\sim 10^{-17}$  W per particle of the mixture. The full width of half maximum (FWHM) of the radiation band monotonically increases under the pressure reducing, reaching 12 nm at the mixture pressure of 1 Torr.