

# Условия одновременного образования хлоридов Ar, Kr и Xe в многоволновом излучателе с накачкой поперечным разрядом

А.К.Шуаибов, А.И.Дашенко

*Исследованы условия образования молекул  $ArCl(B)$ ,  $KrCl(B)$ ,  $XeCl(D,B)$ ,  $Cl(D')$  в импульсном поперечном разряде на смеси  $Ar-Kr-Xe-Cl_2$  ( $p = 2 - 30$  кПа). Показано, что данный разряд является многоволновым источником ВУФ-УФ излучения на  $\lambda = 175, 222, 236, 258$  и  $308$  нм на переходах  $ArCl(B-X)$ ,  $KrCl(B-X)$ ,  $XeCl(D-X)$ ,  $Cl_2(D'-A')$ ,  $XeCl(B-X)$  соответственно. Для получения соизмеримых яркостей излучения на вышеуказанных переходах молекул при умеренном зарядном напряжении ( $4 - 15$  кВ) парциальное давление атомов Kr и Xe в смеси должно находиться в пределах  $0.2 - 0.5$  кПа. Исследуемый разряд представляет интерес для разработки многоволнового электроразрядного излучателя на хлоридах тяжелых инертных газов, работающего в области длин волн  $175 - 308$  нм.*

**Ключевые слова:** поперечный объемный разряд, хлориды инертных газов, многоволновая эксимерная лампа.

## Введение

Эксимерные лампы (ЭЛ) с накачкой электрическими разрядами разных типов являются в настоящее время одними из наиболее мощных и селективных источников спонтанного излучения в диапазоне  $220 - 350$  нм [1, 2]. Они получили широкое применение в микроэлектронике, фотохимии, биологии и квантовой электронике [3, 4]. В большинстве случаев ЭЛ работают на одной фиксированной длине волны, которая определяется составом и давлением рабочей смеси газов.

Для некоторых применений предпочтительнее использование многоволновых ЭЛ, которые излучают одновременно на разных  $B - X$ -переходах галогенидов инертных газов. Это важно как для калибровки импульсных фотоприемников в УФ-ВУФ области спектра, так и для одновременного и селективного воздействия на отдельные энергетические связи химически или биологически активных соединений.

В УФ области нами реализован подобный режим работы ЭЛ с накачкой поперечным объемным разрядом (ПОР) на системе полос с  $\lambda = 222$  (KrCl), 249 (KrF), 308 (XeCl) и 353 нм (XeF). Для этого в ЭЛ применялись рабочие смеси  $He - Kr - Xe - SF_2Cl_2$  [5] и  $He - Kr - Xe - SF_6 - HCl$  [6, 7]. Для расширения спектральной области работы ЭЛ в область меньших длин волн ( $\lambda \leq 190$  нм) перспективно применение хлоридов аргона ( $ArCl$ ,  $\lambda = 175$  нм) и переход на безгелиевые рабочие среды ( $p \leq 30$  кПа).

В настоящей работе исследуются условия одновременного образования молекул  $ArCl(B)$ ,  $KrCl(B)$ ,  $XeCl(D,B)$  и  $Cl_2(D')$  в плазме ПОР на смеси  $Ar - Kr - Xe - Cl_2$ . В качестве носителя хлора выбраны молекулы  $Cl_2$ , т. к. они наиболее приемлемы для образования  $ArCl(B)$  [8] и незначительно уступают по эффективности образования

молекул  $XeCl$  и  $KrCl$  в плазме на смесях инертных газов с  $HCl$  [9].

## 1. Условия эксперимента

Эксимерная лампа с накачкой ПОР имела активную среду размером  $18 \times 2.2 \times 1.0$  см при межэлектродном расстоянии 2.2 см. Схема излучателя приведена в [10]. Для зажигания разряда применялась двухконтурная LC-схема с емкостью основного накопительного конденсатора 30 нФ и общей емкостью обострительных конденсаторов 9.4 нФ. В качестве коммутатора применялся водородный тиратрон ТГИ1-1000/25. Низкая индуктивность основной цепи питания ПОР ( $L \leq 10$  нГн), наличие изоляторов с высокой диэлектрической проницаемостью (блоки импульсных керамических конденсаторов, залитых эпоксидным компаундом), стоящих между плазмой ПОР и заземленными экранами [10], и короткий импульс тока (длительность менее 30 нс) делают данную схему близкой к схемам получения высокоскоростных волн ионизации в импульсном продольном разряде [11, 12].

Регистрация излучения плазмы ПОР проводилась с использованием полуметрового вакуумного монохроматора (схема Сейи - Намиоки) с дифракционной решеткой 1200 штр./мм. Обратная линейная дисперсия вакуумного спектрофотометра составляла 1.4 нм/мм. Разрядная камера ЭЛ герметически соединялась с монохроматором через окно из  $CaF_2$ . В качестве фотоприемника использовался ФЭУ-142 с окном из LiF. Камера с ФЭУ совместно с камерой дифракционной решетки откачивалась до остаточного давления  $p \leq 10^{-3}$  Па. Рабочий диапазон длин волн вакуумного спектрометра составлял 130–350 нм. Относительная калибровка системы монохроматор – ФЭУ-142 проводилась в области 165–350 нм по непрерывному излучению молекул водорода. Под яркостью электронно-колебательной полосы с неразрешенной вращательной структурой понималась площадь под соответствующей кривой на диаграммной ленте самописца.

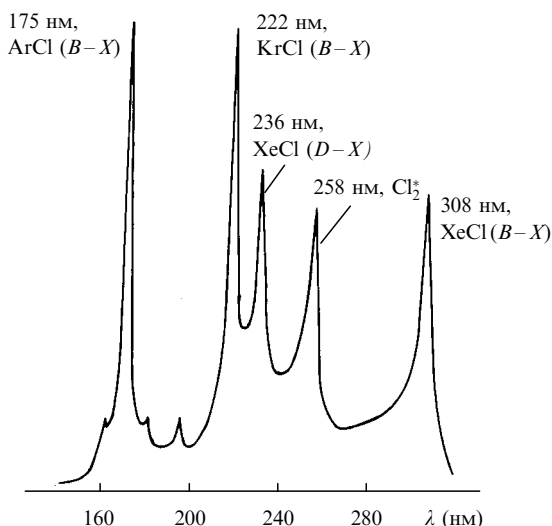


Рис.1. Спектр излучения электроразрядной плазмы на смеси Ar-Kr-Xe-Cl<sub>2</sub> ( $p = 15$  кПа,  $U_{ch} = 12$  кВ).

## 2. Оптические и ресурсные характеристики

Типичный спектр излучения плазмы ПОР в многокомпонентной смеси приведен на рис.1. Распределение интенсивности представлено без учета спектральной чувствительности системы регистрации излучения. В ПОР на смеси Ar-Kr-Xe-Cl<sub>2</sub> основное излучение сосредоточено на переходах XeCl ( $D, B-X$ ), Cl<sub>2</sub> ( $D'-A'$ ), KrCl ( $B-X$ ) и ArCl ( $B-X$ ). На основе данной газовой среды реализован также режим работы ЭЛ на системах полос 258 и 175 нм (смесь Ar-Cl<sub>2</sub>), 258, 222 и 175 нм (Ar-Kr-Cl<sub>2</sub>), 308, 258, 236 и 175 нм (Ar-Xe-Cl<sub>2</sub>), 258 и 222 нм (Kr-Cl<sub>2</sub>) и 308, 258 и 236 нм (Xe-Cl<sub>2</sub>). Замена молекул хлора хлористым водородом приводила к значительному (в 2-3 раза) уменьшению яркости излучения полос с  $\lambda = 175$  и 258 нм.

Оптимальное давление молекул Cl<sub>2</sub>, необходимое для получения максимальной яркости полос Cl<sub>2</sub> ( $D'-A'$ ) и ArCl ( $B-X$ ) в ПОР на смесях Ar-Cl<sub>2</sub> (HCl), находится в пределах 0.2-0.4 кПа, а давление HCl - в пределах 0.07-0.10 кПа. Это обусловлено различным характером поглощения молекулами Cl<sub>2</sub> и HCl в ВУФ области спектра и разной эффективностью их образования. ПОР устойчиво зажигался при напряжении заряда  $U_{ch} \geq 4.0$  кВ. Увеличение зарядного напряжения от 4 до 12 кВ приводило к росту яркости всех наблюдаемых полос в 2-5 раз (рис.2).

На рис.3 представлена зависимость яркости излучения данных полос от давления буферного газа в ПОР на смеси Ar-Kr-Xe-Cl<sub>2</sub>. Оптимальное давление аргона находится в диапазоне 15-20 кПа. Наибольшая яркость излучения XeCl ( $D-X$ ) наблюдалась при пониженных давлениях смеси ( $p \leq 3$  кПа). При умеренном зарядном напряжении ( $U_{ch} \leq 12$  кВ) и  $p \geq 30$  кПа наблюдалось контрагирование ПОР. Получение соизмеримых по яркости полос излучения XeCl ( $D, B-X$ ), KrCl ( $B-X$ ), ArCl ( $B-X$ ) и Cl<sub>2</sub> ( $D'-A'$ ) было возможно в областях низкого (5-10 кПа) и повышенного (20-30 кПа) давлений смеси.

Зависимость яркости основных полос излучения плазмы ПОР в смеси Ar-Kr-Xe-Cl<sub>2</sub> от давления ксенона представлена на рис.4. Увеличение давления Xe приводит к уменьшению яркости полос с  $\lambda = 236, 222$  и 175 нм и увеличению яркости полосы с  $\lambda = 308$  нм. При увеличе-

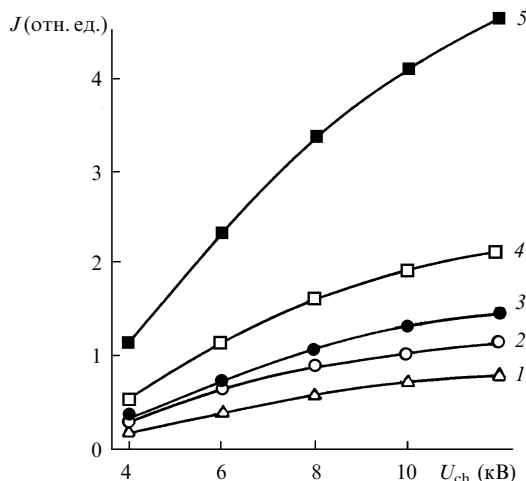
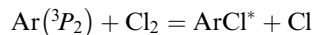


Рис.2. Зависимости яркости  $J$  излучения полос с  $\lambda = 175$  нм ArCl (1), 222 нм KrCl (2), 236 нм XeCl ( $D-X$ ) (3), 258 нм Cl<sub>2</sub> ( $D'-A'$ ) (4) и 308 нм XeCl ( $B-X$ ) (5) в ПОР на смеси состава Ar:Kr:Xe:Cl<sub>2</sub> = 13.3:0.6:0.6:0.24 кПа от зарядного напряжения  $U_{ch}$ .

нии давления Xe выше 1 кПа наблюдается насыщение роста (спада) яркости всех полос. Для  $\lambda = 258$  нм молекул Cl<sub>2</sub> максимум яркости наблюдался при давлении Xe, равном 0.5 кПа. Получение соизмеримых по яркости полос в исследуемой среде возможно при давлении ксенона 0.2-0.5 кПа.

Для изучаемых плазменных сред с  $p \leq 30$  кПа, в отличие от активных сред эксимерных лазеров и ламп высокого давления, роль ион-ионной рекомбинации (например,  $Ar^+ + Cl^- + (Ar) = ArCl^* + (Ar)$ ) понижается при уменьшении давления от 100 до 10 кПа, т.к. константа скорости данной реакции уменьшается при этом на порядок [13]. На начальной стадии разряда превалирует гарпунная реакция [15, 16]



( $k = 7 \cdot 10$  см<sup>3</sup>/с [14]), для которой важно наличие возбужденных атомов инертных газов в плазме. В связи с этим распределение интенсивности излучения в исследуемой плазме в значительной степени определяется передачей

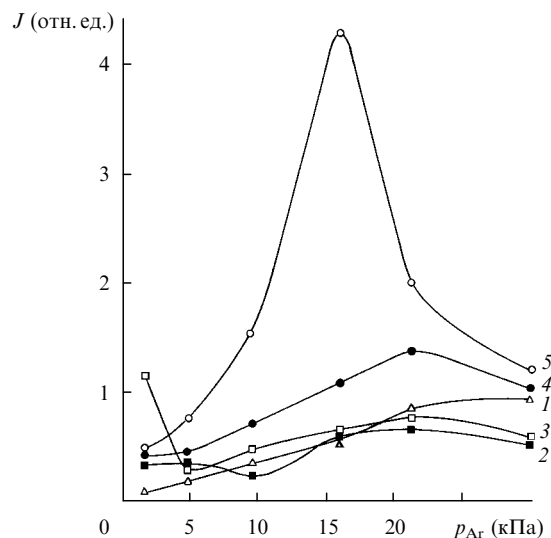


Рис.3. Зависимости яркости  $J$  полос с  $\lambda = 175$  (1), 222 (2), 236 (3), 258 (4) и 308 нм (5) в плазме ПОР на смеси состава Ar:Kr:Xe:Cl<sub>2</sub> =  $p_{Ar}:0.7:0.4:0.24$  кПа от давления аргона ( $U_{ch} = 12.5$  кВ).

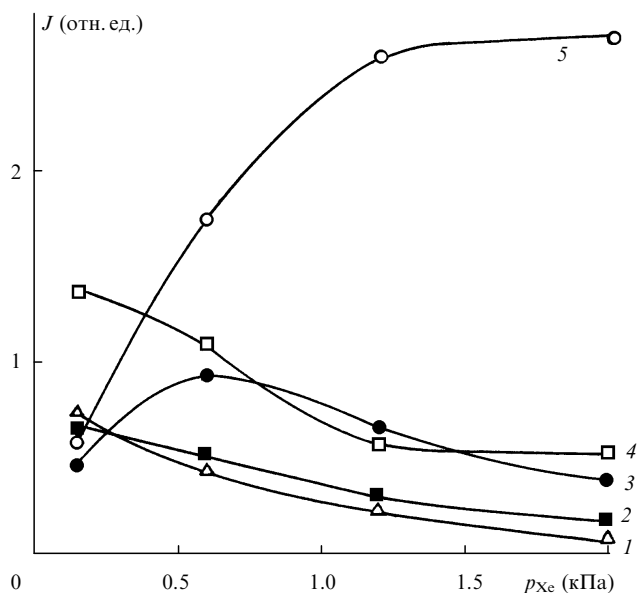


Рис.4. Зависимости яркости  $J$  полос с  $\lambda = 175$  (1), 222 (2), 236 (3), 258 (4) и 308 нм (5) в ПОР на смеси состава Ar:Kr:Xe:Cl<sub>2</sub> = 13.3:0.4: $p_{Xe}$ :0.24 кПа от давления ксенона ( $U_{ch} = 12$  кВ).

энергии по каналу Ar\* – Xe, Kr [17, 18], что также можно интерпретировать как замещение атомов Ar и Kr атомами Xe при образовании эксимерных молекул в многокомпонентной рабочей среде.

На рис.5 приведена зависимость яркости полос в ПОР на смеси Ar – Kr – Xe – Cl<sub>2</sub> от числа разрядных импульсов. Исследование ресурсных характеристик проводилось в газостатическом режиме при пассивном объеме разрядной камеры 10 л. Ресурс в основном определялся чистотой буферного газа (Ar технической чистоты) и мог быть существенно повышен. Добавки небольшого количества H<sub>2</sub> ( $p \leq 130$  Па) приводили к незначительному уменьшению яркости излучения полос и росту ресурса работы в 3–5 раз. При давлении H<sub>2</sub>, равном 0.5–0.7 кПа, в спектрах излучения плазмы наблюдались полосы Лаймана молекулы H<sub>2</sub> с  $\lambda = 158–161$  нм и континуум в области 165–400 нм; яркость излучения эксимерных полос уменьшалась при этом на порядок. Такое влияние H<sub>2</sub> на оптические характеристики ПОР, вероятно, обусловлено передачей энергии по каналу Ar\* – H<sub>2</sub> [19] и образованием ArH\* [20].

## Заключение

Таким образом, исследование условий одновременного образования хлоридов инертных газов и Cl<sub>2</sub>\* в поперечном разряде на смеси Ar – Kr – Xe – Cl<sub>2</sub> показало, что он является многоволновым источником излучения на системе полос с  $\lambda = 175, 222, 236, 258$  и 308 нм. Оптимальное давление смеси составляет 15–20 кПа, а парциальное давление хлора равно 0.2–0.4 кПа. Для получения соизмеримых по яркости полос парциальное давление атомов Kr, Xe должно находиться в пределах 0.2–0.5 кПа. Добавка H<sub>2</sub> к смеси (при давлении не менее 0.5 кПа) расширяет диапазон работы излучателя в ВУФ область до 158 нм, но приводит к уменьшению яркости эксимерных полос на порядок. При давлении H<sub>2</sub>, равном 130 Па, яркость излучения полос изменяется мало, а ресурс работы смеси значительно возрастает (до  $(3–5) \cdot 10^4$  имп.).

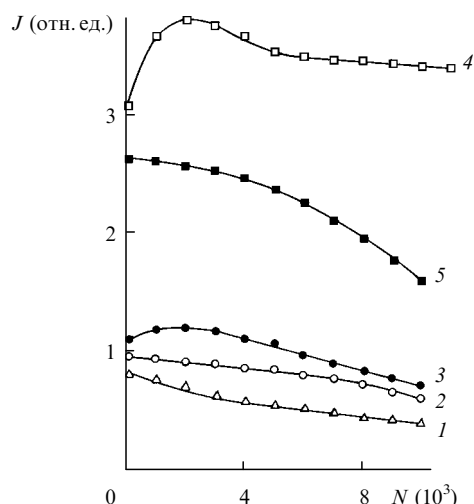


Рис.5. Зависимости яркости  $J$  полос с  $\lambda = 175$  (1), 222 (2), 236 (3), 300 (4) и 258 нм (5) от числа импульсов ПОР на смеси состава Ar:Kr:Xe:Cl<sub>2</sub> = 13.3:0.4:0.5:0.24 кПа.

1. Коваль Б.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. *ПТЭ*, № 4, 244 (1992).
2. Борисов В.М., Водчиц В.А., Ельцов А.В. и др. *Квантовая электроника*, **25**, 308 (1998).
3. Kogelshanz U., Esrom H. *Laser und Optoelectronic*, **22**, 55 (1990).
4. Басов Ю.Г. *Источники накачки микросекундных лазеров* (М., Энергоатомиздат, 1990, с.240).
5. Шуайбов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В. *ПТЭ*, № 3, 142 (1998).
6. Шуайбов А.К. *ТВТ*, **36**, 508 (1998).
7. Шуайбов А.К. *ЖТФ*, **68**, № 12, 64 (1998).
8. Шуайбов А.К., Шимон Л.Л., Дашченко А.И., Неймет Ю.Ю. и др. *Письма в ЖТФ*, **25**, № 11, 29 (1999).
9. Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. *ЖТФ*, **67**, № 1, 78 (1997).
10. Шуайбов А.К. *Квантовая электроника*, **26**, 127 (1999).
11. Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Марковец В.В. *ТВТ*, **21**, 371 (1983).
12. Абрамов А.Г., Асиновский Э.И., Василяк Л.М. *Физика плазмы*, **14**, 979 (1988).
13. Фланнери М.Р. В кн.: *Газовые лазеры* (М., Мир, 1986. с.548).
14. Врублевский Э.М., Гусев А.В., Жидков А. Е., Киреев В.Ю. и др. *Химия высоких энергий*, **24**, 356 (1990).
15. Гордон Е.Б., Егоров В.Г., Михельсоо В.Т. и др. *Квантовая электроника*, **15**, 285 (1988).
16. Пеэт В.Э., Сливинский Е.В., Трещалов А.Б. *Квантовая электроника*, **17**, 438 (1990).
17. Piper L.G., Setser D.W. *J.Chem.Phys.*, **63**, 5018 (1975).
18. Chen C.H., Judisch J.P., Payne M.G. *J.Phys.B*, **11**, 2189 (1979).
19. Лавров Б.П., Мельников А.С. *Оптика и спектроскопия*, **85**, 729 (1989).
20. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Юровский В.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **13**, 1828 (1986).

**A.K.Shuaibov, A.I.Dashchenko. Conditions for the simultaneous formation of Ar, Kr, and Xe chlorides in a multiwave radiation source pumped by a transverse discharge.**

Conditions for the formation of ArCl(*B*), KrCl(*B*), XeCl(*D*, *B*), and Cl<sub>2</sub>(*D'*) molecules in a pulsed transverse discharge based on an Ar – Kr – Xe – Cl<sub>2</sub> mixture ( $p = 2–30$  kPa) were investigated. It is shown that the discharge is a multiwave source of VUV – UV radiation at  $\lambda = 175, 222, 236, 258,$  and 308 nm in transitions ArCl (*B* – *X*), KrCl (*B* – *X*), XeCl (*D* – *X*), Cl<sub>2</sub> (*D'* – *A'*), and XeCl (*B* – *X*), respectively. In order to obtain comparable brightness of the radiation as a result of the above transitions of the molecules at a moderate charging voltage (4–15 kV), the partial pressure of the Kr and Xe atoms in the mixture must be in the range 0.2–0.5 kPa. The discharge investigated is of interest for developing a multiwave electric-discharge-pumped radiation source based on chlorides of heavy rare gases emitting in the range 175–308 nm.