

04;07;12

## Экциплексно-галогенные широкополосные лампы на смесях инертных газов с молекулами хлора и фреона-12

© А.К. Шуайбов, И.В. Шевера

Ужгородский национальный университет,  
88000 Ужгород, Украина  
e-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

(Поступило в Редакцию 21 ноября 2006 г.)

Представлены результаты исследований спектральных характеристик эффективных коротковолновых источников излучения на переходах моногалогенидов аргона, криптона и ксенона, а также молекул хлора с возбуждением продольным тлеющим разрядом низкого давления. При использовании в лампах комплексных рабочих смесей  $Ar-Kr-(Xe)-Cl_2$  было оптимизировано излучение молекул  $ArCl^*$ ,  $KrCl^*$ ,  $XeCl^*$ ,  $Cl_2^{**}$  и  $Cl_2^*$  в спектральном диапазоне 170–350 nm. Средняя мощность излучения ламп находилась в диапазоне 1–10 W при КПД  $\leq 25\%$ . На смесях гелия с молекулами хлора и фреона-12 проведена оптимизация широкополосных ламп на переходах молекулы хлора и продуктов распада молекул фреона-12 ( $CF_2Cl_2$ ). Это позволило создать лампы, излучающие в спектральном диапазоне 140–270 nm и не содержащие в составе рабочих смесей дорогостоящие инертные газы (Xe, Kr).

Экциплексно-галогенные лампы с широкополосным спектром излучения в ВУФ–УФ-диапазоне представляют интерес для применения в спектрометрах при исследовании поглощения в качестве источника зондирующего излучения, а также в химии высоких энергий, экологии и медицине.

PACS: 85.60.Jb

### Введение

Тлеющий разряд постоянного тока в смесях тяжелых инертных газов ( $R = Ar, Kr, Xe$ ) с галогеносодержащими молекулами систематически исследуется уже в течение последних 25 лет [1], что обусловлено широким использованием такой плазмы в химии высоких энергий и микроэлектронике [2]. На начальном этапе работы эти исследования ограничивались в основном изучением электронных кинетических коэффициентов в тлеющем разряде на смесях  $R-F_2(Cl_2)$ . Впервые интенсивное излучение молекул  $XeCl$  в непрерывном режиме было получено в тлеющем разряде низкого давления при смешивании газовых потоков [3].

На высокую эффективность образования молекул  $XeCl$  в непрерывном режиме возбуждения тлеющим разрядом при газостатических условиях впервые было обращено внимание в 1992 г., что позволило получить мощность излучения на  $\lambda = 308$  nm, равную 8 W [4]. В настоящее время созданы отпаянные лампы постоянного тока, излучающие на полосах молекул  $KrCl$  и  $XeCl$  с длиной плазменной среды до 4 m и мощностью излучения — 1.6 kW (222 nm  $KrCl$ )–1.1 kW (308 nm  $XeCl$ ) [5]. В подобных, а также в ряде менее мощных (но в некоторых случаях более эффективных) лампах использовались преимущественно простые рабочие смеси вида  $Kr(Xe)-Cl_2(NF_3)$  [6,7]. Спектральная ширина излучения базовой полосы в таких лампах не превышала 5–10 nm. Переход от одной длины волны излучения к другой в подобных источниках излучения требует замены газовой смеси или (для отпаянных ламп) замены самой лампы. При применении в спектрометрах, где исследуется по-

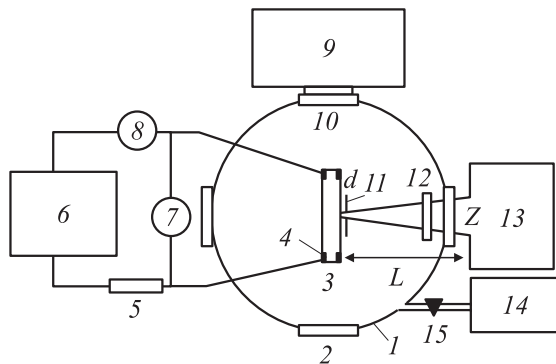
глощение в УФ–ВУФ-диапазоне длин волн, необходимо использование широкополосных излучателей. Для селективного действия на разные молекулярные связи с энергией 4–10 eV химически или биологически активных соединений и для других применений необходимы простые и довольно мощные лампы, излучающие в виде широких ( $\Delta\lambda = 30–150$  nm) УФ–ВУФ-полос. Такие газоразрядные УФ–ВУФ-лампы могут быть разработаны на основе сложных рабочих смесей, которые включают разные атомы тяжелых инертных газов и различные молекулы-галогеносодержатели. Эмиссионные характеристики такой плазмы, получаемой с помощью продольного тлеющего разряда низкого давления, исследованы мало.

Одновременное образование моногалогенидов инертных газов изучалось при средних и атмосферных давлениях в разряде переменного тока через диэлектрик (газоразрядная индикаторная панель) [8–10] и поперечном объемном разряде субмикросекундной длительности [11,12].

В настоящей работе обобщаются результаты разработки и оптимизации широкополосных экциплексно-галогенных УФ–ВУФ-излучателей с возбуждением продольным тлеющим разрядом на смесях инертных газов с хлорсодержащими молекулами.

### Методика, техника и условия эксперимента

Для исследования эмиссионных характеристик плазмы, которая формировалась в продольном тлеющем разряде, использовалась экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Она состояла из



**Рис. 1.** Схема установки для исследования широкополосных эксиплексно-галогенных ламп: 1 — буферная камера, 2 — окна из кварца, 3 — разрядная трубка, 4 — электроды, 5 — балластное сопротивление, 6 — высоковольтный выпрямитель, 7 — миллиамперметр, 8 — киловольтметр, 9 — вакуумный спектрометр, 10 — окно из LiF, 11 — диафрагма, 12 — фильтр, 13 — измеритель мощности спонтанного излучения „Кварц-01“, 14 — вакуумная и газосмесительная системы, 15 — вакуумный кран.

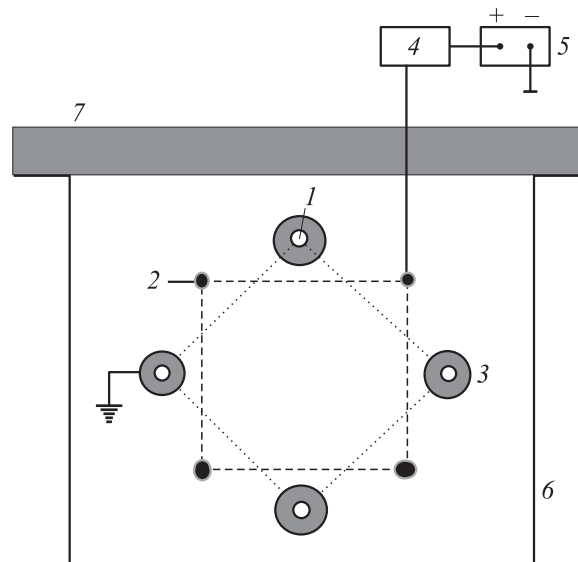
вакуумного монохроматора (или монохроматора МДР-2 с дифракционной решеткой 1200 стр/мм), разрядных трубок, измерителей тока разряда, спада напряжения на электродах излучателя и абсолютной мощности УФ–ВУФ-излучения. В эксперименте проводились исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) тлеющего разряда, мощности, которая вкладывается в разряд ( $W_{el} = I_{ch} \cdot U_{ch}$ , где  $I_{ch}$  — ток тлеющего разряда, а  $U_{ch}$  — спад напряжения на электродах лампы), спектральных характеристик излучения плазмы в диапазоне 120–350 nm, зависимостей яркости излучения молекулярных полос от величины давления и парциального состава рабочих смесей, абсолютной мощности УФ–ВУФ-излучения лампы ( $W_{em}$ ) и ее коэффициента полезного действия (КПД) ( $\eta = W_{em}/W_{el} \cdot 100\%$ ). Спектры излучения в большинстве случаев корректировались на величину относительной спектральной чувствительности системы „монохроматор + фотоумножитель“. Величина яркости спектральной полосы, под которой понималась площадь под соответствующей кривой на диаграммной ленте, также определялась с учетом спектральной чувствительности системы регистрации излучения. Спектры регистрировались с помощью фотоумножителей ФЭУ-142 и ФЭУ-106.

Средняя мощность излучения лампы со всей поверхности разрядной трубки определялась по фотометрической методике [13,14].

Тлеющий разряд зажигался в цилиндрических разрядных трубках из высококачественного кварца. Исследование оптических характеристик широкополосных излучателей на основе монохлоридов Ag, Kг и Хе, а также молекул  $Cl_2^{**}$ ,  $Cl_2^*$  проводилось в узкой разрядной трубке с открытыми торцами, установленной в буферной

камере объемом 10 л. Камера была герметически состыкована через LiF-окно с вакуумным монохроматором (рис. 1). В этом случае применялись разрядные трубки с внутренним диаметром 0.5 см и расстоянием между анодом и катодом 10 см. Электроды были изготовлены из листового никеля и имели одинаковую цилиндрическую форму (длиной 1 см). Тлеющий разряд в трубке поджигался при помощи высоковольтного выпрямителя ( $U \leq 30$  kV;  $I \leq 100$  mA).

Кроме плазмы положительного столба представляют интерес для использования в эксиплексно-галогенных излучателях постоянного тока и другие области тлеющего разряда. Исследование характеристик излучателей на молекулах хлора [15] и хлорида криптона [16] проводилось также в вольерном разряде (рис. 2). В таком типе разряда возможно формирование отрицательного катодного свечения большой площади, яркость излучения которой в несколько раз больше, чем яркость излучения плазмы положительного столба продольного тлеющего разряда [17]. Место для формирования положительного столба в вольерном разряде отсутствует. Электроды вольерного разряда состояли из четырех катодных и четырех анодных стержней длиной 15.6 и диаметром 0.3 см. Они равномерно устанавливались по поверхности цилиндра диаметром 3 см. Постоянное напряжение подавалось на аноды через балластное сопротивление 1 kΩ, а все катоды заземлялись. Система электродов вольерного разряда была установлена в разрядной камере объемом 10 л. Рабочие смеси предварительно готовились в вакуумной газосмесительной системе и напускались в разрядную камеру или кварцевую трубку.



**Рис. 2.** Схема непрерывной УФ–ВУФ-лампы с накачкой вольерным разрядом: 1 — катоды, 2 — аноды, 3 — плазма отрицательного катодного свечения, 4 — балластное сопротивление, 5 — высоковольтный выпрямитель, 6 — разрядная камера, 7 — диэлектрический фланец.

## Излучатели на димерах хлора и продуктах диссоциации молекул фреона-12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ )

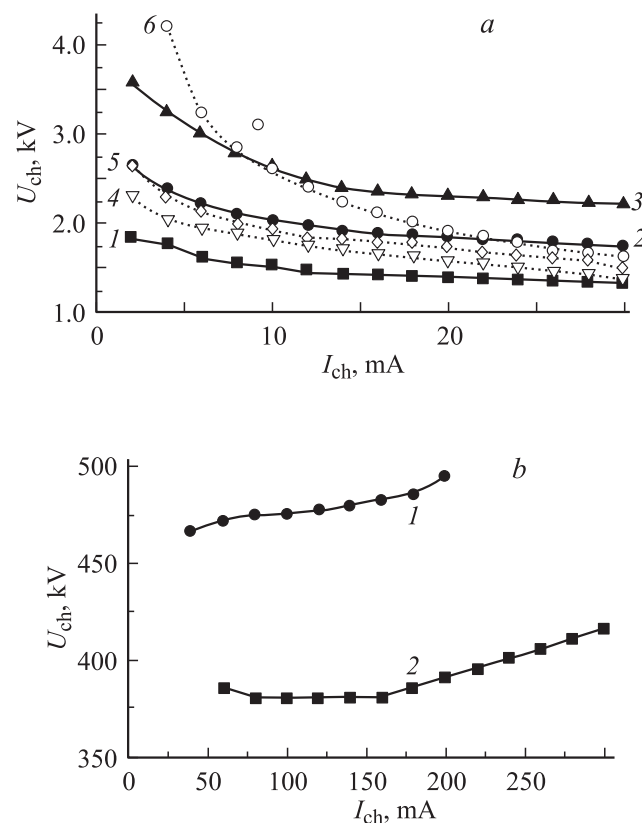
Перспективность использования смеси  $\text{He}-\text{Cl}_2$  в импульсных многоволновых излучателях была установлена раньше при возбуждении этой смеси поперечным объемным разрядом малой длительности [18–20]. В таких рабочих средах отсутствуют дорогостоящие тяжелые инертные газы, что создает условия для работы в режиме медленной прокачки рабочей смеси. При этом возможны длительная работа УФ–ВУФ-излучателя и повышение его энергетических параметров.

Тлеющий разряд в смесях  $\text{He}-\text{Cl}_2$  ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) существовал в достаточно однородном состоянии только при общем давлении рабочей смеси  $P \leq 3-4$  и  $P(\text{Cl}_2) \leq 1$  кПа. Диаметр плазмы шнура уменьшался с увеличением  $P(\text{Cl}_2, \text{CF}_2\text{Cl}_2)$  от 3 до 1 мм. Контрагирование разряда хотя и приводит к уменьшению боковой поверхности цилиндрического плазменного излучателя, но является наиболее простым способом изоляции разряда от контакта со стеклянной разрядной трубкой. Это предотвращает потери галогенонесителя на диффузию в кварц при сильном нагревании трубки („жестчание“ газовой смеси [21]).

Вольерный разряд на смесях  $\text{He}(\text{Kr})-\text{Cl}_2$  устойчиво зажигался при давлении газовых смесей 100–1500 Па и существовал в форме четырех катодных плазменных образований длиной по 15.6 и диаметром 0.5–1.0 см. Формирование общей области отрицательного катодного свечения во внутренней части системы электродов вольерного разряда не наблюдалось. Поэтому данную область в коаксиальной лампе можно применить в системах очистки питьевой воды или получения озона, где рабочее вещество прокачивается в средней части плазмохимического реактора.

Типичные ВАХ тлеющего разряда (рис. 3) при  $I_{\text{ch}} \leq 10$  мА имели форму, которая соответствует его поднормальной стадии, а при более высоких токах разряд переходил в нормальный режим горения. Возрастание парциального давления хлора и общего давления смеси  $\text{He}-\text{Cl}_2$  приводило к значительному увеличению потенциала зажигания разряда и величины  $U_{\text{ch}}$  в нормальном режиме горения разряда. Для разряда в фреоне-12 при увеличении давления  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  от 130 до 670 Па квазистационарная величина напряжения увеличивалась с 1.7 до 2.5, а потенциал зажигания — от 2.0 до 3.5 кВ [22]. Величина мощности, вкладываемая в плазму, увеличивалась с ростом давления фреона-12 и достигала 45–65 Вт.

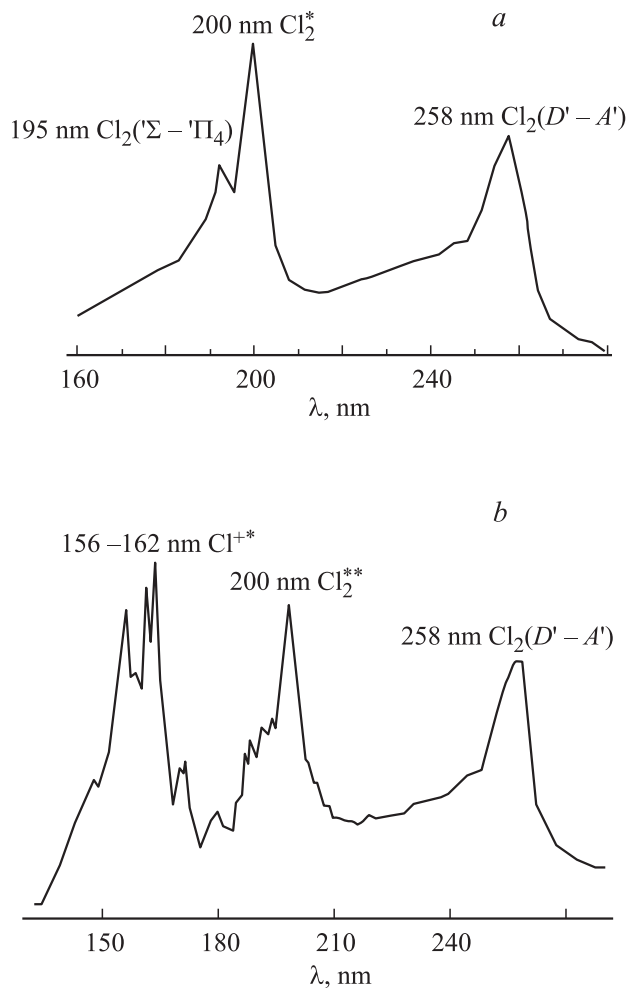
ВАХ вольерного разряда больше соответствовали аномальной стадии тлеющего разряда, хотя в смеси  $\text{Kr}-\text{Cl}_2$  фиксировался поднормальный (при  $I_{\text{ch}} \leq 80$  мА) и нормальный (80–160) режимы горения. Электрическая мощность вольерного разряда (при  $U_{\text{ch}} \leq 1$  кВ) линейно возрастала с увеличением тока и достигала



**Рис. 3.** Вольт-амперные характеристики тлеющего разряда на смеси  $\text{He}-\text{Cl}_2$  (а) и вольерного разряда на смесях  $\text{He}(\text{Kr})-\text{Cl}_2$  (б):  $P(\text{He})-P(\text{Cl}_2) = 130-30$  (1), 130–70 (2), 130–130 (3), 400–20 (4), 670–20 (5) и 2000–20 (6) Па (а);  $P(\text{He})-P(\text{Cl}_2) = 670-130$  (1),  $P(\text{Kr})-P(\text{Cl}_2) = 270-130$  (2) Па (б).

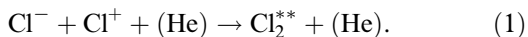
125 Вт. Система электродов при  $I_{\text{ch}} \leq 300$  мА значительно не нагревалась, так как энергия, которая терялась на образование быстрых нейтральных частиц, в вольерном разряде значительно ниже по сравнению с продольным тлеющим разрядом. Поэтому такие излучатели не требуют принудительного водяного охлаждения при  $I_{\text{ch}} \leq 300$  мА.

Спектры излучения плазмы на основе смесей  $\text{He}-\text{Cl}_2(\text{CF}_2\text{Cl}_2)$  представлены на рис. 4. В спектрах излучения тлеющего разряда наблюдаются широкие полосы 258 нм  $\text{Cl}_2(D' - A')$ , 160–195 нм  $\text{Cl}_2(^1\Sigma - ^1\Pi)$  и максимум излучения молекул хлора при 200 нм. Половина мощности излучения такой плазмы сконцентрирована в ВУФ-области спектра. Основной особенностью спектров излучения плазмы на основе фреона-12 является наличие яркого максимума в спектральном диапазоне 140–170 нм проявляющегося на фоне излучения полос хлора и состоящего из спектральных линий иона  $\text{Cl}^+$ . Наличие интенсивных спектральных линий ионов  $\text{Cl}^+$  косвенно подтверждает ион-ионный характер плазмы контрагированного разряда. В этом случае одним из основных процессов образования возбужденных моле-



**Рис. 4.** Спектры излучения плазмы тлеющего (*a*) и контрагированных разрядов (*b*) в смесях гелия с молекулами хлора  $P(\text{He})-P(\text{Cl}_2) = 530-130$  Па (*a*), и фреона-12  $P(\text{He})-P(\text{CF}_2\text{Cl}_2) = 130-40$  (*b*), Па.

кул хлора может быть реакция

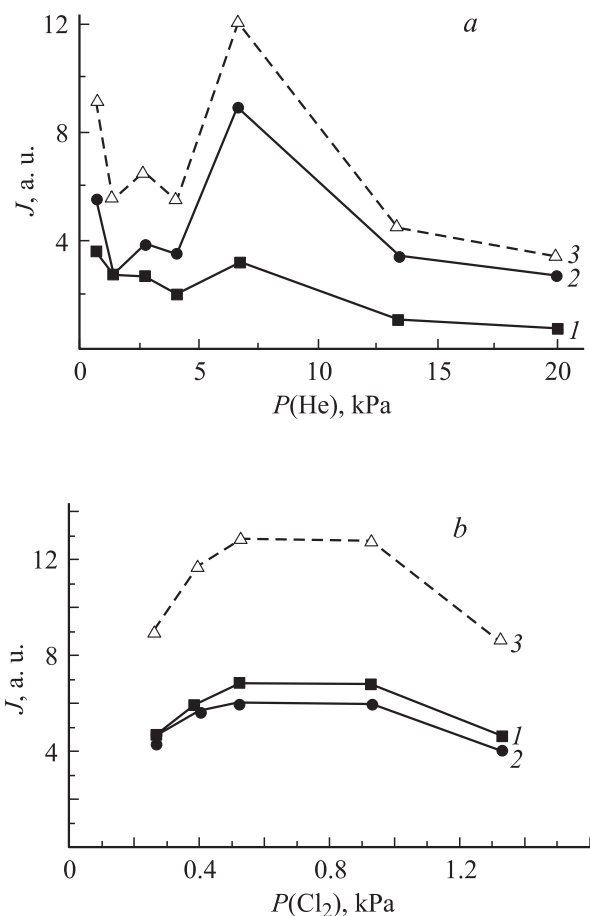


Таким образом, видно, что плазма на основе тлеющего (в том числе и вольерного) разряда, излучает единую широкую полосу в пределах 160–270 nm, а основное излучение плазмы контрагированного разряда в фреон-содержащих средах сконцентрировано в спектральном диапазоне 130–270 nm.

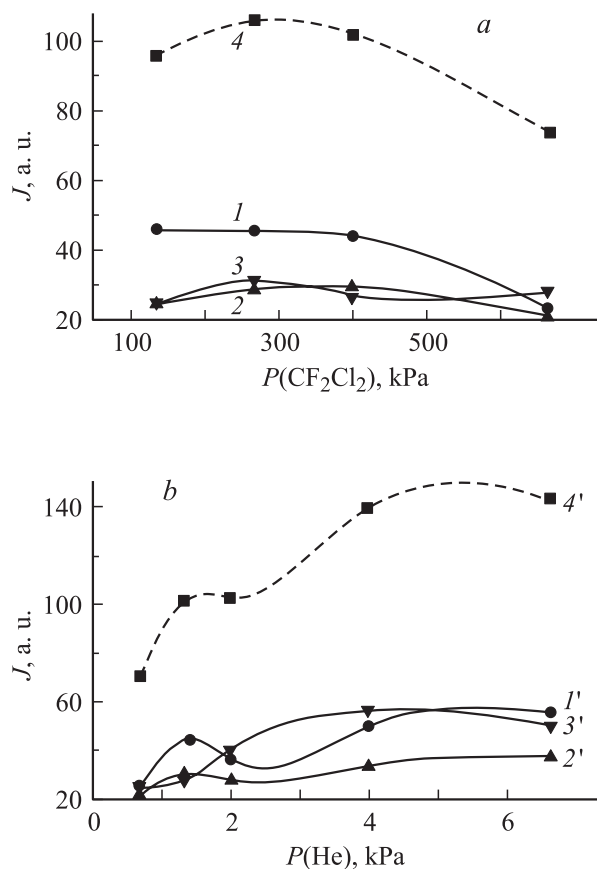
Для стадии более или менее однородного тлеющего разряда, когда давление рабочей смеси не превышало 1.5–2.0 kPa, оптимальное давление гелия составляло  $P(\text{He}) = 0.6-0.7$  kPa, а для контрагированного разряда — 60 kPa (рис. 5, *a*). Из этого следует, что удельная яркость излучения ион-ионной плазмы контрагированного разряда в смеси He–Cl<sub>2</sub> существенно превышает яркость УФ–ВУФ-излучения однородной стадии тлеющего разряда. Яркости излучения полос 258 и 200 nm примерно равны между собой на однородной стадии разряда,

а для плазменного шнура яркость полосы 258 nm — в 2.5–3.0 раза выше яркости полосы 200 nm. Оптимальное содержание хлора в разряде — 0.6–1.0 kPa. В разряде на смеси  $P(\text{He})-P(\text{Cl}_2) = 1.33-0.53$  kPa зависимость яркости излучения полосы 258 nm от величины тока была линейно возрастающей, а для полосы 200 nm она приходила в насыщение при  $I_{\text{ch}} \geq 20$  mA. Для разряда в смеси  $P(\text{He}) - P(\text{Cl}_2) = 4.0 - 2.0$  kPa при  $I_{\text{ch}} = 20-25$  mA наблюдался скачкообразный переход тлеющего разряда в контрагированное состояние. При этом яркость полосы 258 nm продолжала увеличиваться с ростом тока, а яркость полосы 200 nm приходила в насыщение и уменьшалась. Величина полной мощности УФ–ВУФ-излучения лампы достигала 3 W при КПД  $\leq 5\%$ .

Результаты оптимизации яркости УФ–ВУФ-излучения в зависимости от парциального состава смеси He–CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> представлены на рис. 6. Для плазмы на основе фреона-12 соответствующие данные приведены в работе [22]. Оптимальная величина  $P(\text{CF}_2\text{Cl}_2)$  находилась



**Рис. 5.** Зависимости яркости излучения полос 200 nm Cl<sub>2</sub><sup>\*\*</sup> (1), 258 nm Cl<sub>2</sub>(D' - A') (2) и суммарной яркости УФ-излучения плазмы тлеющего разряда в смеси He–Cl<sub>2</sub> (3) от парциального давления гелия при  $P(\text{Cl}_2) = 200$  (*a*) и хлора при  $P(\text{He}) = 1330$  Па (*b*).



**Рис. 6.** Зависимость яркости излучения плазмы контрагированного разряда в смеси  $He-CF_2Cl_2$  от парциального давления гелия при  $P(CF_2Cl_2) = 40$  Па (*b*) в спектральных диапазонах 130–175 (*I, I'*), 175–215 (*2, 2'*), 215–280 (*3, 3'*) и суммарной яркости в спектральном диапазоне 130–280 нм (*4, 4'*).

в диапазоне 300–500 Па. Наиболее чувствительным к содержанию фреона-12 в смеси было излучение ионов  $Cl^{+*}$  (рис. 6, *a*). Оптимальное давление гелия в смеси находилось в пределах 5–6 кПа. Увеличение тока разряда от 2 до 30 мА приводило к возрастанию яркости излучения молекул хлора и спектральных линий ионов хлора. При работе в газостатическом режиме (без применения горячей пассивировки лампы в фреоне-12) наибольшим ресурс излучения разряда в смеси  $P(He) - P(CF_2Cl_2)$  был на  $\lambda = 200$  нм ( $t_p \geq 1$  h при  $I_{ch} = 20$  мА). При скорости продольной прокачки 0.03–0.3 л/мин была возможна устойчивая работа излучателя в течение нескольких десятков часов. Средняя мощность излучения в спектральном диапазоне 130–280 нм достигала 1.5–2 Вт при КПД  $\leq 3\%$ .

Для вольерного разряда в смеси  $He-Cl_2$  наиболее оптимальными были смеси  $P(He) = 1.2-1.5$  и  $P(Cl_2) = 0.3-0.4$  кПа. Величина средней мощности УФ–ВУФ-излучения с одного катодного стержня достигала 1 Вт при КПД = 4%.

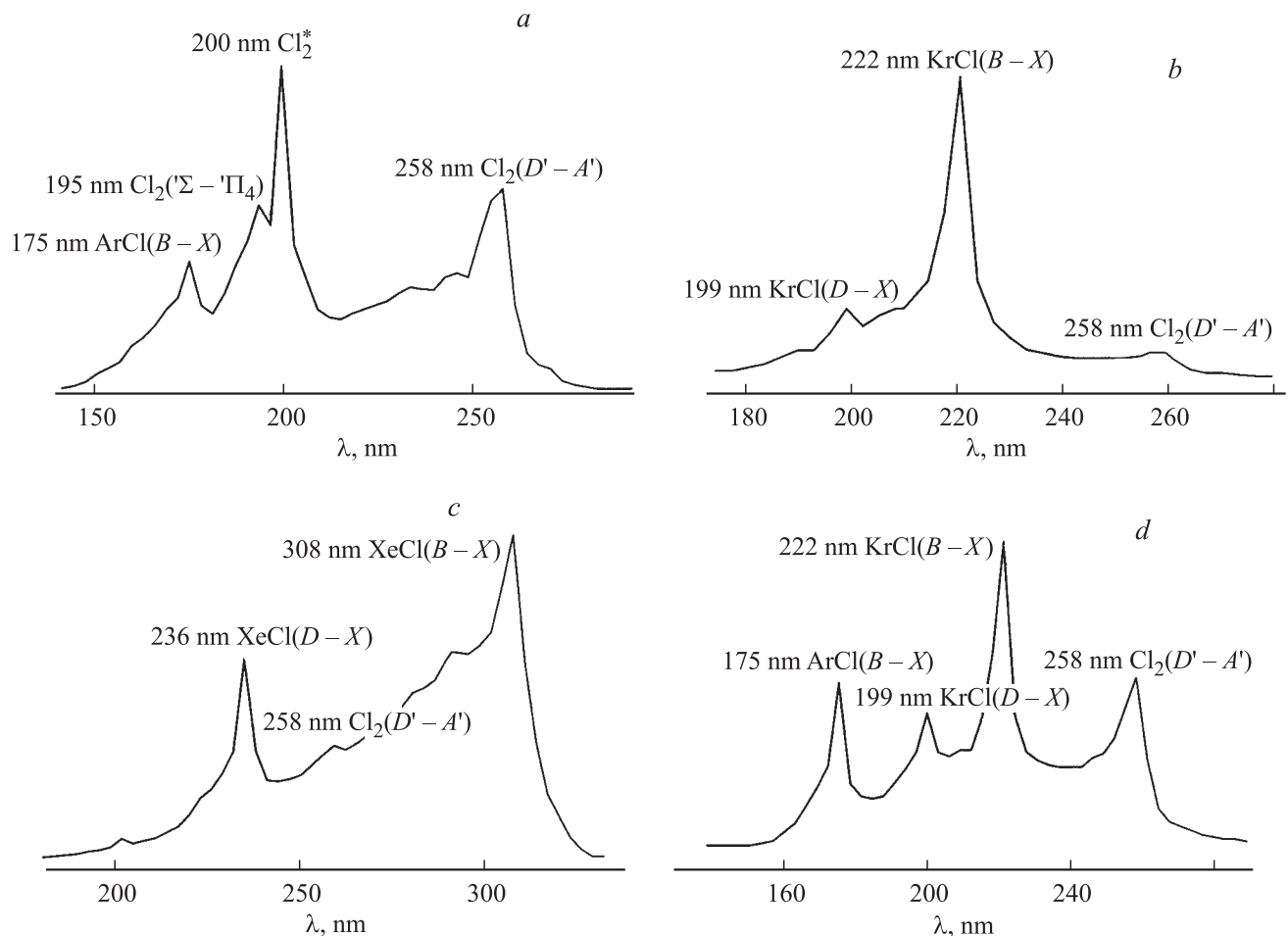
## Эксплексно-галогенные излучатели низкого давления на смесях аргона, криптона и ксенона с молекулами хлора

Продольный тлеющий разряд в смесях  $Ar(Kr, Xe)-Cl_2$  существовал в виде слаботочной и сильноточной стадий, переход между которыми происходил в форме скачка при  $I_{ch} = 1-2$  мА. ВАХ тлеющего разряда и их поведение в зависимости от состава и давления рабочих смесей были близкими к ВАХ разряда на смеси  $He-Cl_2$ . Мощность, вкладываемая в разряд, находилась в пределах 5–40 Вт.

Спектры излучения лампы на смесях тяжелых инертных газов с молекулами хлора представлены на рис. 7. Они состояли из сильно уширенных полос молекул  $ArCl(B-X)$ ,  $KrCl(D, B-X)$ ,  $XeCl(D, B-X)$  и  $Cl_2(D'-A')$ . За счет значительного перекрытия все полосы излучения сливались в единый континуум в диапазоне 170–320 нм с максимумами 175–200–308 (смесь  $Ar-Cl_2$ ), 199–222–258 (смесь  $Kr-Cl_2$ ), 236–308 (смесь  $Xe-Cl_2$ ) и 175–199–222–258 нм (смесь  $Ar-Kr-Cl_2$ ) [23–26]. Спектр излучения лампы на четвертой смеси более равномерно перекрывал спектральный диапазон 170–320 нм и, по сравнению с рис. 7, *d*, имел еще дополнительные максимумы при  $\lambda = 236$  и 308 нм. Основной причиной формирования широкополосного излучения на основе полос монохлоридов  $Ar$ ,  $Kr$  и  $Xe$ , а также молекул хлора в тлеющем разряде на сложных рабочих смесях низкого давления является малая скорость процесса колебательной релаксации в пределах  $D$  и  $B$  состояний эксплексной молекулы и возбужденных состояний молекулы хлора [27].

Для оптимизации работы широкополосной эксплексно-галогенной лампы спектральный диапазон 170–320 нм условно разделялся на отдельные составляющие с максимумами в области кантов полос и учетом формы отдельной электронно-колебательной полосы так, что при их сшивке получались исходные спектры. Распределение парциальных составляющих яркости излучения для тройных аргонсодержащих смесей было следующим: 175 (15%), 199 (17), 222 (44), 258 (24), (смесь  $P(Ar) - P(Kr) - P(Cl_2) = 1.33 - 0.4 - 0.6$  кПа) и 175 (23%), 200 (10), 236 (13), 258 (30) и 308 нм (24) (смесь  $P(Ar) - P(Xe) - P(Cl_2) = 2.8 - 1.2 - 0.16$  кПа). При использовании в рабочей среде криптона и ксенона (смесь  $P(Kr) - P(Xe) - P(Cl_2) = 2.8 - 1.2 - 0.6$  кПа) парциальный вклад отдельных составляющих в яркость континуума была таким: 199 (5%), 222 (11), 236 (8), 258 (12) и 308 нм (64). Для лампы на основе четырехкомпонентной ( $Ar-Kr-Xe-Cl_2$ ) смеси было получено следующее распределение парциальных составляющих континуума в спектральном диапазоне 170–320 нм: 175 (5%), 200 (6), 222 (11), 236 (9), 258 (16) и 308 нм (53).





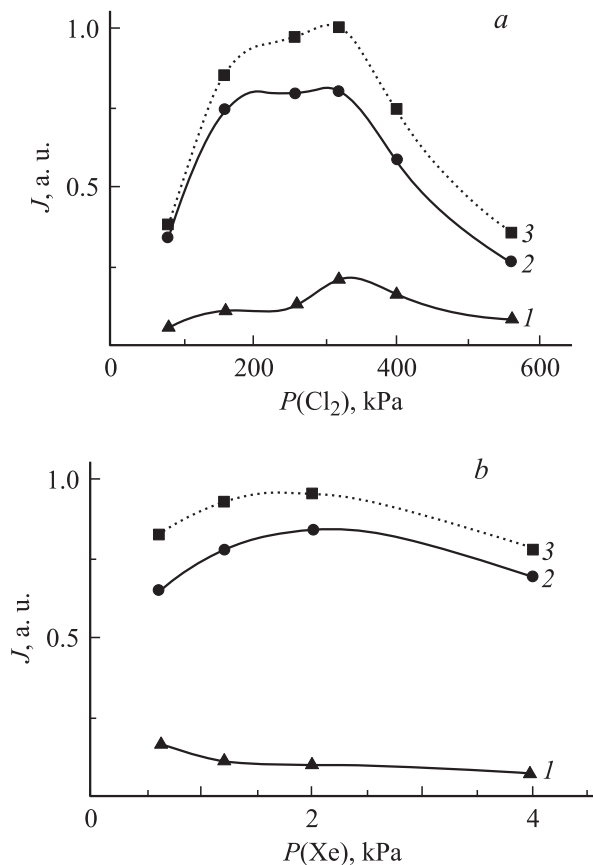
**Рис. 7.** Спектры излучения широкополосных эксимерно-галогенных ламп постоянного тока на смесях  $\text{Ar}-\text{Cl}_2$  (a),  $\text{Kr}-\text{Cl}_2$  (b),  $\text{Xe}-\text{Cl}_2$  (c) и  $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{Cl}_2$  (d).

Результаты оптимизации рабочих сред эксимерно-галогенных излучателей на двойных смесях представлены на рис. 8 и 9. Оптимальное парциальное давление хлора находилось в диапазоне 250–320 Па. Вклад яркости излучения полосы 236 nm  $\text{XeCl}(D-X)$  в суммарную яркость УФ-излучения лампы на смеси  $\text{Xe}-\text{Cl}_2$  достигал 10–20% (рис. 9). Оптимальное парциальное давление  $\text{Ar}$ ,  $\text{Kr}$  и  $\text{Xe}$  в двойных смесях увеличивалось при уменьшении атомного веса атома инертного газа и находилось в диапазоне 2–4 кПа. Оптимальная величина  $P(\text{Ar})$ , необходимая для получения максимальной яркости полос 200 и 258 nm в тлеющем разряде на смеси  $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ , была равна 2 кПа (рис. 9). Максимальная скорость увеличения яркости излучения полос  $\text{ArCl}$  и  $\text{Cl}_2^*$  получена в диапазоне разрядных токов 1–4 мА (поднормальный режим горения разряда) (рис. 10). При больших разрядных токах наблюдалась линейная зависимость яркости полос излучения от величины тока.

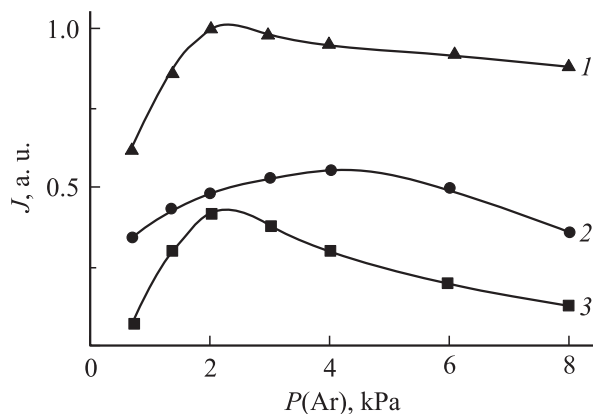
Зависимость яркости излучения основных полос из плазмы тлеющего разряда в смеси  $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{Cl}_2$  от величины парциального давления  $\text{Ar}$  и  $\text{Kr}$  приведена на рис. 11. Яркости полос  $\text{KrCl}(B-X)$  и  $\text{Cl}_2(D'-A')$

были примерно равны между собой и в 2.0–2.5 раза превышали яркость излучения полос  $\text{KrCl}(D-X)$  и  $\text{ArCl}(B-X)$ . Оптимальное значение  $P(\text{Ar})$  находилось в диапазоне 2.5–3.5, а для полосы 199 nm оно было равным 4.0 кПа. При увеличении содержания криптона в смеси  $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{Cl}_2$  наблюдалось возрастание яркости полос 258 и 222 nm, а для полосы 175 nm  $\text{ArCl}(B-X)$  максимум яркости получен при  $P(\text{Kr}) = 0.5$  кПа. Дальнейшее увеличение парциального давления криптона в смеси приводило к уменьшению яркости излучения полосы 175 nm.

Для излучателей на смесях  $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$ ,  $\text{Kr}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$  оптимальное парциальное давление хлора находилось в диапазоне 150–300 Па, а оптимальная величина  $P(\text{Ar}) \leq 1.33$  кПа. Соотношение парциальных давлений тяжелых инертных газов, при котором в формировании широкополосного УФ–ВУФ-излучения принимают участие разные эксимерные молекулы и молекулы хлора, было таким:  $P(\text{Ar}) - P(\text{Xe}) = 30 - (1 - 3)$  и  $P(\text{Kr}) - P(\text{Xe}) = (10 - 15) - (3 - 4)$ . Для смеси  $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$  оптимальная величина общего давления не превышала 2 кПа, а значения  $P(\text{Kr})$  и



**Рис. 8.** Зависимость яркости излучения полос  $\text{XeCl}(D, B-X)$  и суммарной яркости лампы в спектральном диапазоне 180–340 нм от величины парциального давления хлора при  $P(\text{Xe}) = 2.0$  кПа (а) и парциального давления ксенона при  $P(\text{Cl}_2) = 80$  Па (б): 236 (1), 308 (2) и  $\Delta\lambda = 180\text{--}340$  нм (3) ( $I_{\text{ch}} = 8$  мА).

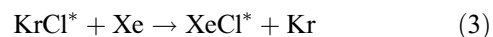


**Рис. 9.** Зависимость яркости излучения полос 175 (1), 200 (2) и 258 нм (3) от величины парциального давления аргона в разряде на смеси  $\text{Ar-Cl}_2$  при  $P(\text{Cl}_2) = 0.4$  кПа и  $I_{\text{ch}} = 10$  мА.

$P(\text{Xe})$  находились в диапазоне 100–250 Па. Распределение яркости излучения разряда в четверной смеси было наиболее чувствительным к величине

$P(\text{Xe})$ . Близким к оптимальному было соотношение  $P(\text{Kr}) - P(\text{Xe}) = (2.0\text{--}2.5) - (1.0\text{--}1.5)$ .

В лампах на основе сложных газовых смесей важную роль играют реакции замещения

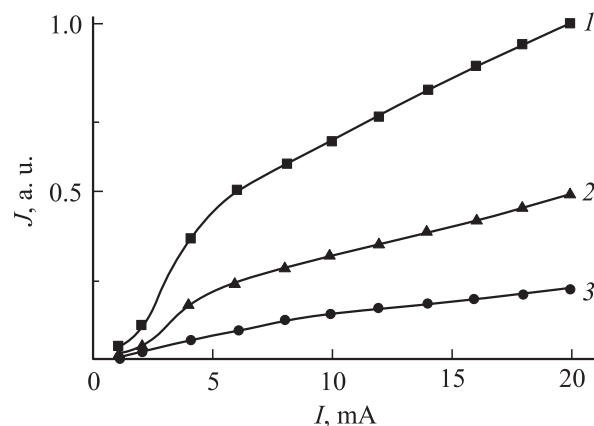


и процессы передачи энергии  $\text{Ar}(m) \rightarrow \text{Kr, Xe}$ ;  $\text{Kr}(m) \rightarrow \text{Xe}$ . Величина константы скорости таких реакций может достигать  $10^{-9}$  см<sup>3</sup>/с [29–31], поэтому значительная часть эксиплексных молекул в плазме образуется в непрямых процессах.

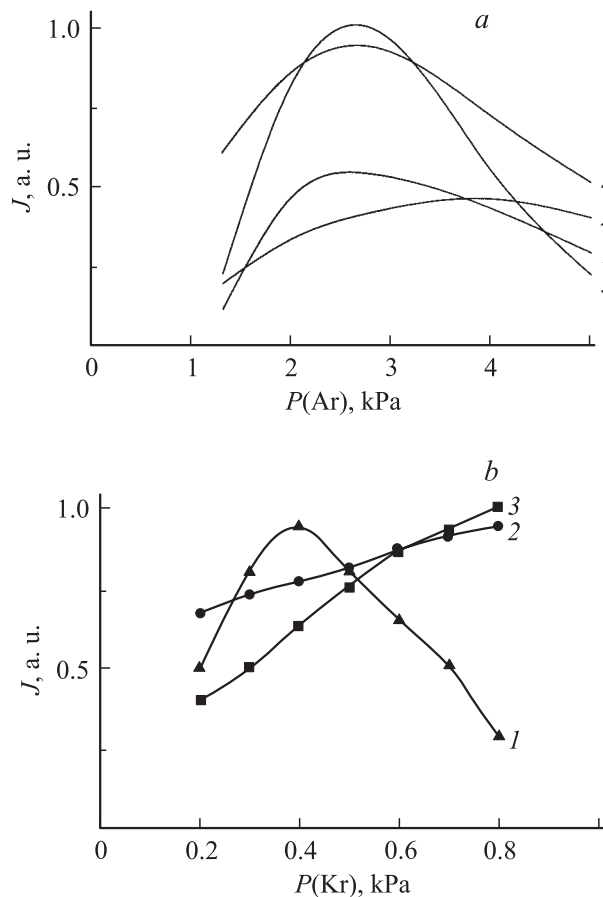
Средняя мощность излучения ламп на двойных газовых смесях находится в пределах 2–8 Вт при КПД 7–21%. Наиболее эффективной была смесь  $P(\text{Xe}) - P(\text{Cl}_2) = 3.6\text{--}0.16$  Па. Широкополосные эксиплексно-галогенные излучатели на сложных смесях типа  $\text{Ar-Kr-Xe-Cl}_2$  по мощности излучения (6 Вт) и КПД ( $\eta \leq 25\%$ ) близки к характеристикам ламп на смеси  $\text{Xe-Cl}_2$ , но они позволяют более равномерно перекрывать спектральный диапазон 170–320 нм и более экономно расходовать дорогостоящие инертные газы (Kr, Xe).

В излучателе на смеси  $\text{Ar}(\text{Xe})\text{-Cl}_2\text{-воздух}$  за счет использования излучения полос молекул азота ( $\lambda = 227, 237$  и  $247$  нм третья система Каплана и четвертая позитивная система молекулы азота) было достигнуто более однородное перекрытие спектрального диапазона 200–270 нм. Наиболее оптимальной была смесь  $P(\text{Ar}) - P(\text{Xe}) - P(\text{Cl}_2) - \text{воздух} = 6.0 - 0.8 - 0.08 - 0.01$  кПа. При увеличении парциального давления хлора до 250–300 Па в спектрах излучения плазмы оставались только полосы эксиплексных молекул и хлора.

Рассмотрим кратко основные характеристики лампы с накачкой вольерным разрядом постоянного тока. Увеличение  $P(\text{Kr})$  в вольерном разряде на смеси  $\text{Kr-Cl}_2$  от 250 до 550 Па приводило к возрастанию



**Рис. 10.** Зависимость яркости излучения лампы на смеси  $P(\text{Ar})\text{-(Cl}_2) = 4.0\text{--}0.16$  кПа: 175 (1), 200 (2) и 258 нм (3) от величины тока тлеющего разряда.



**Рис. 11.** Зависимости яркости полос излучения 175 (1), 199 (2), 222 (3) и 258 nm (4) от величины  $P(\text{Ar})$  в тлеющем разряде на смеси  $P(\text{Ar}) - P(\text{Kr}) - P(\text{Cl}_2) = P(\text{Ar}) - 0.40 - 0.16$  kPa (a) и полос 175 (1), 222 (2), 258 nm (3) от  $P(\text{Kr})$  в разряде на смеси  $P(\text{Ar}) - P(\text{Kr}) - P(\text{Cl}_2) = 6.0 - P(\text{Kr}) - 0.08$  kPa (b).

яркости полосы 222 nm  $\text{KrCl}(B-X)$ , а яркость полосы 258 nm  $\text{Cl}_2(D'-A')$  при этом уменьшалась. Зависимости яркости полос  $\text{KrCl}^*$  и  $\text{Cl}_2^*$  от величины разрядного тока в диапазоне 10–300 mA были линейно возрастающими. Наиболее оптимальной была газовая смесь  $P(\text{Kr}) - P(\text{Cl}_2) = (500-700) - (200-270)$  Pa. Средняя мощность УФ–ВУФ-излучения с одного катодного стержня достигала 3 W при КПД  $\leq 10\%$ .

## Заключение

Из состояния разработок эксиплексно-галогенных излучателей с возбуждением продольным тлеющим разрядом следует, что исследование характеристик ламп на 175 nm  $\text{ArCl}^*$  и широкополосных ламп на комплексных рабочих средах типа  $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$  не проводилось, а в галогенных лампах на смесях  $\text{He}-\text{Cl}_2(\text{CF}_2\text{Cl}_2)$  во внимание принималось только излучение полосы 258 nm  $\text{Cl}_2(D'-A')$ . Разработанные лампы излучали преимущественно на одной полосе  $B-X$  молекулы  $\text{RX}^*$ . Для

довольно большого количества применений в спектроскопии, химии высоких энергий и экологии важным является получение излучения во всем (или его части) спектральном диапазоне 170–320 nm, поскольку водородные лампы имеют слишком низкий КПД, а доля УФ–ВУФ-излучения в ксеноновых и кластерных лампах в данном спектральном диапазоне также небольшая.

На основании уширения полос излучения эксиплексных молекул и молекул хлора при низком давлении рабочих смесей, что связано с замедлением колебательной релаксации в пределах возбужденных состояний молекул и замедлением релаксации заселенности высоколежащих состояний молекул, а также с применением комбинации разных рабочих и галогенсодержащих газов были разработаны простые широкополосные эксиплексно-галогенные излучатели.

Экспериментально установлено, что спектральный диапазон излучателей на смесях  $\text{He}-\text{Cl}_2-(\text{CF}_2\text{Cl}_2)$  может быть расширен с 240 до 160(130) nm, а мощность и КПД лампы могут быть увеличены примерно в два раза. В фреонсодержащих средах контрагированного разряда важную роль играет излучение ион-ионной плазмы, так как наиболее коротковолновая часть спектра излучения лампы формируется излучением ионов  $\text{Cl}^{+*}$ , а образование возбужденных молекул хлора в токовом канале может происходить в реакции рекомбинации положительных и отрицательных ионов хлора.

Установлены основные характеристики широкополосной лампы постоянного тока на монохлоридах тяжелых инертных газов и молекулах хлора: базовые длины волн полос излучения 175, 199, 200, 222, 236, 258 и 308 nm позволяют формировать континуум в спектральном диапазоне 170–320 nm; полная мощность излучения такой лампы находится в диапазоне 2–8 W при КПД  $\leq 25\%$ ; комплексные рабочие среды типа  $\text{Ar}-\text{Kr}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$  по мощности излучения и КПД приближаются к выходным характеристикам лампы на смеси  $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ ; максимальная эффективность излучателя достигалась в поднормальном режиме горения разряда (при  $I_{\text{ch}} \leq 5$  mA).

Плазма отрицательного катодного свечения вольерного разряда в смесях инертных газов с хлором является мощным и достаточно эффективным источником широкополосного УФ–ВУФ-излучения в спектральном диапазоне 190–260 nm; лампа излучает с мощностью 10–12 W при КПД  $\leq 10\%$  и не требует принудительного водяного охлаждения. Перспективным является также использование приэлектродных слоев поперечного высокочастотного разряда, у которого на переходе „плазма-слой“ в галогенсодержащих средах формируется ион-ионная плазма, где эффективность образования эксиплексных молекул примерно на порядок выше, чем в плазме положительного столба.

Исходя из близости свойств продольного тлеющего разряда постоянного тока и емкостного разряда [5] полученные результаты по оптимизации УФ–ВУФ-излучателей низкого давления на хлоридах инертных газов и молекул хлора могут быть распространены и



на аналогичные рабочие среды эксплексно-галогенных ламп с возбуждением емкостным разрядом. Это позволит значительно увеличить ресурс работы УФ–ВУФ-излучателей, но излучение в этом случае будет импульсным, а не постоянным.

## Список литературы

- [1] *Зайцев В.В.* // Опт. и спектр. 1992. Т. 72. Вып. 4. С. 859–870.
- [2] *Данилин Б.С., Киреев В.Ю.* Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 45–63.
- [3] *Михельсоо В.Т., Трещалов А.Б., Пёт В.Э., Ялвисте Э.Х.* // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 7. С. 1404–1406.
- [4] *Головицкий А.П.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 24. Вып. 8. С. 73–76.
- [5] *Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [6] *Головицкий А.П., Кан С.Н.* // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 3. С. 604–609.
- [7] *Бойченко А.М., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И.* // Квантовая электроника. 1996. Т. 23. № 5. С. 3–5.
- [8] *Шуаибов А.К., Шевера В.С.* // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 4. С. 1747–1748.
- [9] *Шевера В.С., Шуаибов А.К.* // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 4. С. 728–736.
- [10] *Шуаибов А.К., Шевера В.С., Герц С.Ю., Малинин А.Н.* // Укр. физ. журн. 1983. Т. 28. Вып. 12. С. 1808–1813.
- [11] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В.* // ПТЭ. 1998. № 3. С. 142–144.
- [12] *Шуаибов А.К., Дащенко А.И.* // ПТЭ. 2000. № 3. С. 101–103.
- [13] *Гуревич М.М.* Фотометрия: теория, методы и приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
- [14] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // ПТЭ. 2002. № 1. С. 104–106.
- [15] *Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 6. С. 23–28.
- [16] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В.* Эксимерно-галогенная лампа с накачкой вольерным разрядом. Патент UA 53509 А. Приоритет от 20.06.2002, опубликован 15.01.2003. Б.И. № 1.
- [17] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [18] *Шуаибов А.К.* // ТВТ. 2000. Т. 38. № 4. С. 674–676.
- [19] *Шуаибов А.К.* // ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 9. С. 1–6.
- [20] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 2. С. 77.
- [21] *Светцов В.И., Максимов А.И., Куприяновская А.П.* и др. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1977. № 7. С. 36–39.
- [22] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Дащенко А.И.* // Прикладная физика. 2002. № 2. С. 51–56.
- [23] *Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // ЖПС. 2001. № 2. С. 275–277.
- [24] *Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 4. С. 371–372.
- [25] *Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 8. С. 121–123.
- [26] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В.* Электроразрядная эксимерная лампа низкого давления. Патент UA 47626 А. Приоритет от 28.05.2001, опубликован 15.07.2002. Б.И. № 7.
- [27] *Дацюк В.В., Измайлов И.А., Кочелан В.А.* // УФН. 1998. Т. 168. Вып. 4. С. 410–439.
- [28] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // Тез. докл. III Междунар. науч.-техн. конф. „Фундаментальные и прикладные проблемы физики“. Саранск, Россия, 2001. С. 46.
- [29] *Шуаибов А.К., Шевера В.С.* // Опт. и спектр. 1979. Т. 47. Вып. 2. С. 409–410.
- [30] *Брау Ч.* Эксимерные лазеры / Под ред. Ч. Роудза. М.: Мир, 1981.
- [31] *Cook J.D., Leichner P.K.* // Phys. Rev. A. 1991. Vol. 43. P. 1614–1617.