

УДК 537.5;621.387

## ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ УФ–ВУФ-ЛАМПЫ НА СИСТЕМЕ ПОЛОС МОЛЕКУЛ ХЛОРИДА АРГОНА И ХЛОРА

© 2015 г. А. К. Шуаибов, А. И. Миня, Р. В. Грицак, З. Т. Гомоки

*Ужгородский национальный университет, Украина**E-mail: roksolanija@ukr.net*

Поступила в редакцию 24.03.2014 г.

Приведены результаты экспериментального исследования характеристик двухволновой УФ–ВУФ-лампы на смеси аргона и паров фреона ( $\text{CCl}_4$ ) с накачкой наносекундным барьерным разрядом. Исследованы спектральные характеристики излучателя в области длин волн 160–300 нм, осциллограммы тока и напряжения. Проведена оптимизация интенсивности излучения полос 175 нм  $\text{AgCl}$  ( $B \rightarrow X$ ) и 258 нм  $\text{Cl}_2$  ( $D' \rightarrow A'$ ) при варьировании от давления и парциального состава рабочей смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$ , а также условий зажигания наносекундного разряда с двумя диэлектрическими барьерами. Рассмотрены основные процессы образования молекулы хлорида аргона в барьерном разряде на основе смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$ .

DOI: 10.7868/S0040364415030151

### ВВЕДЕНИЕ

Мощные и эффективные газоразрядные источники УФ–ВУФ-излучения на основе димеров тяжелых инертных газов и их моногалогенидов приходят на смену экологически вредным лампам на парах ртути в фотохимии, фотомедицине, микронанoeлектронике, экологии и других областях науки и техники. По сравнению с ртутными излучателями ( $\lambda = 254$  нм) эксимерные и эксиплексные лампы работают в широкой области длин волн ( $\lambda = 126\text{--}354$  нм), характеризуются одной или несколькими интенсивными молекулярными полосами шириной 1–10 нм при сравнимой их эффективности [1].

Перспективными являются и УФ–ВУФ-излучатели на молекулах галогенов, особенно с участием полосы 258 нм  $\text{Cl}_2$  ( $D' \rightarrow A'$ ) [2,3], длина волны которых близка к спектральной линии атома ртути ртутных ламп, под излучение которых разработано много различных оптических технологий. Большинство эксиплексных газоразрядных ламп возбуждается барьерным разрядом переменного тока частотой 10–100 кГц и импульсами тока микросекундной длительности такой же частоты [4, 5]. Для ряда оптических технологий необходимы УФ–ВУФ-лампы с повышенной импульсной мощностью излучения и высокой энергией в импульсе, которые возбуждаются наносекундным барьерным разрядом [6, 7]. Для применений в качестве бактерицидных средств важным является разработка ламп с излучением, попадающим в главный максимум поглощения ДНК ( $\lambda = 250\text{--}260$  нм), а также во вторич-

ные максимумы поглощения биомолекул, которые находятся в спектральном диапазоне 170–200 нм, например это может быть лампа на полосе 193 нм  $\text{ArF}$  ( $B \rightarrow X$ ) [8]. Для этих целей может быть использована в лампе рабочая среда на основе смеси аргона с парами фреона, поскольку она излучает на системе полос  $\lambda = 258$  нм  $\text{Cl}_2$  ( $D' \rightarrow A'$ ) и 175 нм  $\text{AgCl}$  ( $B \rightarrow X$ ). Предварительные результаты исследования такого излучателя с накачкой наносекундным барьерным разрядом приведены в статье [9].

Аргон в качестве буферного и эксиплексообразующего газа широко используется в газоразрядных молекулярных УФ–ВУФ-лазерах и различных плазмохимических реакторах на основе паров воды и металлов [10], а также в реакторах на основе галогенсодержащих газов [11].

В настоящей работе приводятся результаты исследования характеристик УФ–ВУФ-лампы на основе полос излучения молекул хлора и хлорида аргона, а также численного моделирования параметров плазмы эксиплексно-галогенного излучателя на основе решения кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергиям.

### ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Наносекундный разряд с суммарной длительностью импульсов тока 50–70 нс и двумя диэлектрическими барьерами зажигался в цилиндрической колбе из кварца марки КУ-1. Рабочая длина колбы излучателя составляла 20 см, а диаметр внутренней трубки из кварца был равным 14 мм.

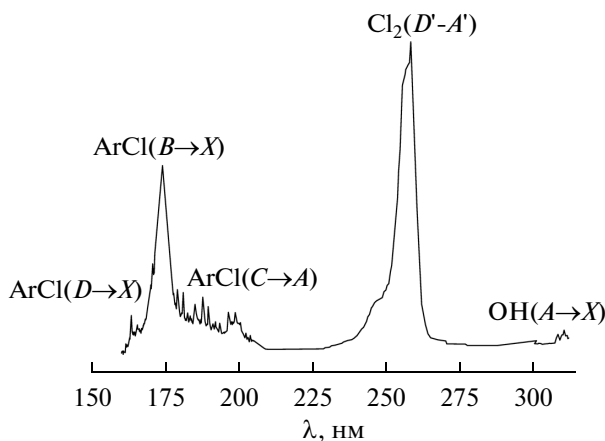


Рис. 1. Спектр излучения импульсно-периодической УФ-ВУФ-лампы барьерного разряда на смеси  $p(\text{Ar})-p(\text{CCl}_4) = 6.7-0.13$  кПа.

Межэлектродное расстояние в барьерном разряде примерно 4.5–5.0 мм. Внутренний электрод был изготовлен из сплошного алюминиевого цилиндра и устанавливался во внутреннюю кварцевую трубку. Внешним электродом служила спираль из никелевого провода, прозрачность которого примерно 80%.

Барьерный разряд зажигался при помощи источника импульсов высокого напряжения с резонансной перезарядкой накопительного импульсного конденсатора емкостью 1.54 нФ и коммутатором – водородным тиратроном ТГИ-1-1000/25. Амплитуда импульсов напряжения на выходе модулятора увеличивалась при помощи импульсного кабельного трансформатора. Амплитуда основного максимума импульса тока достигала 50 А при его длительности 20–30 нс.

Излучение плазмы анализировалось в спектральном диапазоне 140–310 нм с использованием однометрового вакуумного монохроматора и фотомножителя с окном из фторида лития ФЭУ-142. В эксперименте регистрировались усредненные по времени спектры излучения. Лампа стыковалась с входной щелью вакуумного монохроматора через герметизированную кварцевую трубку диаметром 10 мм и LiF – окно. Система регистрации излучения была прокалибрована по относительной спектральной чувствительности.

Частота следования импульсов напряжения и тока могла изменяться в диапазоне  $f = 35-1000$  Гц. Импульсы тока и напряжения регистрировались с использованием пояса Роговского, малоиндуктивного делителя напряжения и скоростного импульсного осциллографа 6-ЛОР. Измерение абсолютной мощности излучения лампы проводилось при помощи прибора “Кварц-01”.

Барьерный разряд наносекундной длительности зажигался в диффузном режиме, а его филаментарная стадия не проявлялась.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рис. 1 представлен типичный спектр излучения УФ-ВУФ-лампы на смеси аргона с парами фреона в двухволновом режиме работы. При относительно небольшом парциальном давлении аргона  $p(\text{Ar}) = 5-10$  кПа в спектрах излучения полосы 175 нм  $\text{ArCl}(B \rightarrow X)$  и 258 нм  $\text{Cl}_2(D' \rightarrow A')$  были соизмеримы по интенсивности. Менее интенсивным было излучение полос молекулы хлорида аргона  $\lambda = 169$  нм  $\text{ArCl}(D \rightarrow X)$  и 199 нм  $\text{ArCl}(C \rightarrow A)$  [12, 13], которое проявлялось только при пониженном давлении рабочей смеси. С увеличением парциального давления аргона ( $p > 20-30$  кПа) и паров фреона (до 200–300 Па) интенсивность полосы излучения  $\lambda = 258$  нм  $\text{Cl}_2(D' \rightarrow A')$  начинала превалировать над интенсивностью полосы хлорида аргона. Особенностью спектра УФ-излучения лампы являлось наличие неразрешенного максимума на коротковолновом канте полосы  $\lambda = 258$  нм  $\text{Cl}_2(D' \rightarrow A')$ , который проявлялся при увеличении давления рабочей смеси и не наблюдался при использовании более простых хлорсодержащих молекул ( $\text{HCl}$ ,  $\text{Cl}_2$ ). Эти особенности УФ-излучения молекулы хлора могут быть обусловлены вкладом излучения продуктов распада молекул  $\text{CCl}_4$  (радикалов  $\text{CCl}^*$  или атомов углерода) в барьерном разряде.

Осциллограммы импульсов напряжения, тока и электрической мощности разряда в смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$  приведены на рис. 2. Амплитуда основного максимума импульса тока достигала 33 А (рабочая смесь  $\text{Ar}-\text{CCl}_4 = 6.6$  кПа – 130 Па, рис. 2а–2в) при его длительности 20–30 нс и 50–60 А (смесь  $\text{Ar}-\text{CCl}_4 = 24$  кПа – 130 Па, рис. 2г–2е) при длительности в диапазоне 25–35 нс. С увеличением давления аргона наблюдалось увеличение амплитуды импульса тока. Амплитуда импульсов напряжения на выходе высоковольтного модулятора увеличивалась при помощи импульсного кабельного трансформатора и достигала 16 кВ (с учетом падения части напряжения на диэлектрических барьерах) для смеси  $p(\text{Ar})-p(\text{CCl}_4) = 6.6-0.13$  кПа и 22 кВ для смеси  $p(\text{Ar})-p(\text{CCl}_4) = 24-0.13$  кПа при длительности отдельного выброса порядка 8–10 нс. Осциллограммы электрической мощности барьерного разряда показали, что во временном диапазоне 50 нс в барьерный разряд вкладывается максимальная энергия. Увеличение парциального давления аргона до 24 кПа приводило к увеличению энерговклада в разряд.

На рис. 3 представлена зависимость интенсивности излучения полосы 175 нм  $\text{ArCl}(B \rightarrow X)$  от

парциального давления паров  $\text{CCl}_4$  при постоянном давлении аргона в рабочей смеси. Для получения максимальной интенсивности полосы хлорида аргона парциальное давление паров фреона должно находиться в диапазоне 200–220 Па. При малом содержании паров фреона в смеси плотность хлорсодержащих молекул слишком низкая для эффективного протекания “гарпунной” реакции между ними и атомами аргона в метастабильных электронных состояниях, а при  $p(\text{CCl}_4) \geq 220$  Па начинает проявляться процесс тушения молекул  $\text{ArCl}(B)$  молекулами  $\text{CCl}_4$  и продуктами их распада в плазме барьерного разряда. Увеличение парциального давления паров фреона в диапазоне 50–300 Па приводило к росту интенсивности полосы излучения молекулы хлора ( $\lambda = 258$  нм) по линейному закону. При этом спектр излучения лампы состоял только из одной полосы хлора при  $p(\text{CCl}_4) = 270\text{--}300$  Па. Для двухволнового режима излучения лампы оптимальное парциальное давление паров фреона находилось в диапазоне 180–220 Па. Оптимальное же парциальное давление аргона для лампы было в диапазоне 5–10 кПа, а увеличение  $p(\text{Ar})$  с 10 до 50 кПа приводило к уменьшению интенсивности полосы 175 нм  $\text{ArCl}(B \rightarrow X)$  примерно на три порядка, а полосы 258 нм  $\text{Cl}_2(D'-A')$  – только в три раза.

Из зависимости средней мощности излучения УФ–ВУФ-лампы с накачкой наносекундным барьерным разрядом в смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$  от парциального давления аргона (рис. 4а) следует, что оптимальная величина  $p(\text{Ar})$  составляет 6–8 кПа. Это согласуется с результатами оптимизации интенсивностей излучения полос 175 и 258 нм, проведенной в спектроскопических экспериментах. Оптимизация средней мощности излучения лампы в зависимости от парциального давления (рис. 4б) показала, что максимальная мощность излучения достигается в диапазоне  $p(\text{CCl}_4) = 120\text{--}220$  Па при фиксированном  $p(\text{Ar})$ . При умеренной частоте следования импульсов накачки ( $f = 80\text{--}100$  Гц) средняя мощность излучения двухволновой эксиплексно-галогенной лампы достигает 1 Вт.

На рис. 5 приведены ресурсные характеристики излучения двухволновой лампы на системе полос 175 нм  $\text{ArCl}(B \rightarrow X)$  и 258 нм  $\text{Cl}_2(D'-A')$ , работающей в квазиотпаянном режиме на одной рабочей смеси. Как и для всех излучателей на хлоридах инертных газов и молекулах хлора (УФ-лазеры и лампы) с рабочими средами на основе молекул фреона, зависимость интенсивности излучения полос от количества разрядных импульсов в лампе на смеси  $p(\text{Ar})-p(\text{CCl}_4) = 13.3\text{--}0.13$  кПа характеризовались увеличением интенсивности при росте количества разрядных импульсов с  $n = 2 \times 10^5$  до  $2.5 \times 10^5$ . При  $n > 2.5 \times 10^5$  интенсивность излучения молекул хлорида аргона

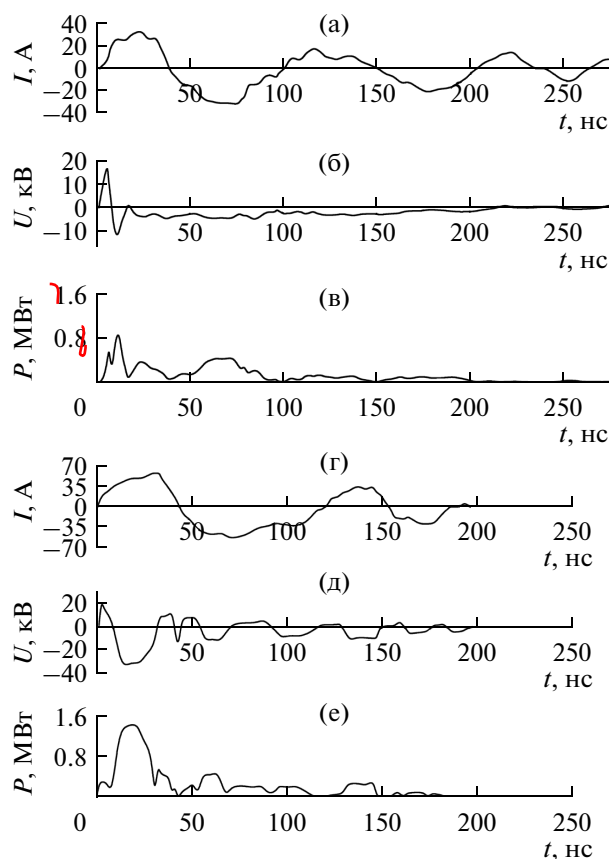


Рис. 2. Осциллограммы импульсов напряжения (а), (г), тока (б), (д) и мощности (в), (е) наносекундного барьерного разряда на смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$  при  $p(\text{Ar}) = 6.6$  кПа (а)–(в) и 24 кПа (г)–(е)  $p(\text{CCl}_4) = 0.13$  кПа,  $U = 13$  кВ,  $f = 80$  Гц.

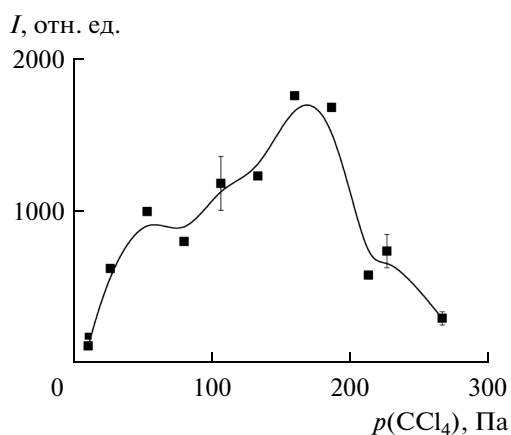


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения полосы  $\text{ArCl}(B \rightarrow X)$  с максимумом при  $\lambda = 175$  нм в УФ–ВУФ-лампе на смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$  при  $p(\text{Ar}) = 6.6$  кПа.

на и хлора выходила на постоянный уровень. Такой вид ресурсных характеристик лампы показывает, что в образовании молекул  $\text{ArCl}^*(B)$  и  $\text{Cl}_2^*(D')$  молекулы  $\text{CCl}_4$  не принимают прямого участия, а

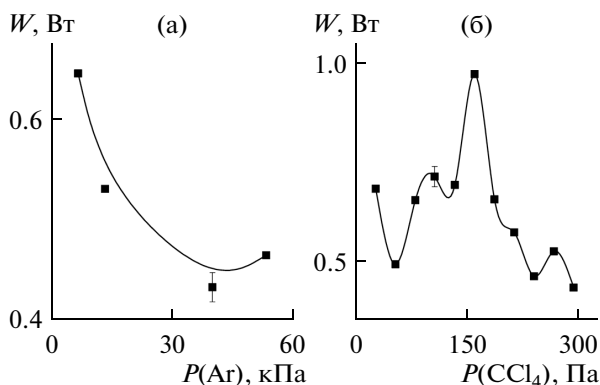


Рис. 4. Зависимости средней мощности излучения лампы на основе смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$  от парциального давления аргона при  $p(\text{CCl}_4) = 130$  Па (а) и паров  $\text{CCl}_4$  при  $p(\text{Ar}) = 24$  кПа (б);  $f = 80$  Гц,  $U = 13$  кВ.

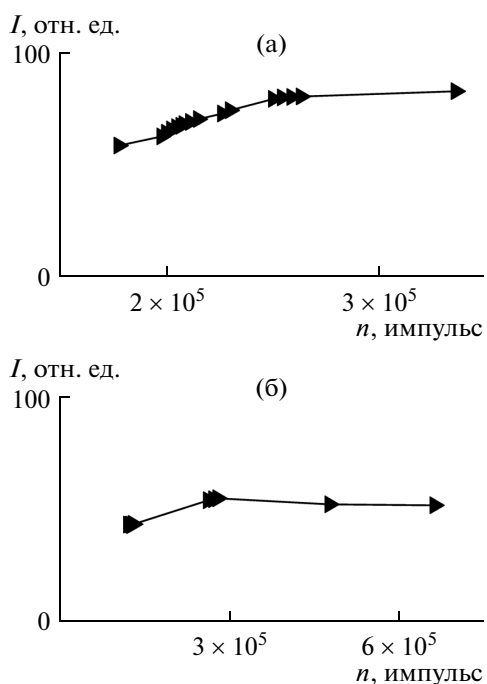


Рис. 5. Зависимости интенсивности излучения полос  $\text{ArCl}(B \rightarrow X)$  (а) и  $\text{Cl}_2^*(D'-A')$  (б) от количества разрядных импульсов в барьерном разряде на смеси  $p(\text{Ar})-p(\text{CCl}_4) = 13.33-0.13$  кПа при  $U_{\text{зар}} = 13$  кВ.

основными в процессах образования этих частиц являются продукты распада молекул фреона в барьерном разряде. В работе [13] приводится константа скорости прямой реакции образования молекул  $\text{ArCl}(B, C)$  в процессе столкновения атомов  $\text{Ar}(^3P_2)$  с молекулой  $\text{CCl}_4$ , равная  $1.6 \times 10^{-11} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ . Это достаточно малая величина, поэтому более эффективно молекулы  $\text{ArCl}(B, C)$  должны образовываться в «гарпунных» реакциях атомов  $\text{Ar}(^3P_2)$  с

незаряженными продуктами (радикалами) – продуктами распада молекулы  $\text{CCl}_4$  и в реакциях ион-ионной рекомбинации положительных ионов  $\text{Ar}^+$ ,  $\text{Ar}_2^+$  с отрицательными ионами  $\text{Cl}^-$ .

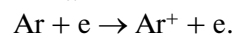
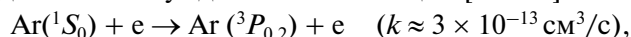
При охлаждении колбы лампы потоком воздуха от вентилятора она могла длительное время работать при частотах следования импульсов тока 40–150 Гц. При более высокой частоте возможным было только кратковременное включение лампы на 5–10 мин. Ресурс работы при этом резко уменьшался, по-видимому, из-за низкой эффективности системы воздушного охлаждения.

#### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ НА ОСНОВЕ МОЛЕКУЛ ФРЕОНА

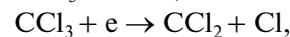
Полное численное моделирование выходных характеристик УФ–ВУФ-лампы барьерного разряда, которое включало бы расчет кинетики процессов и параметров плазмы на основе смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$ , является довольно сложной задачей и в настоящее время не проведено. В данной работе для плазмы на основе молекул фреона рассмотрены основные элементарные процессы образования молекул хлорида аргона и хлора по аналогии с [14], где анализировались процессы в плазме на смеси  $\text{Kr}-\text{CCl}_4$ .

Основная часть энергии барьерного разряда в смеси  $\text{Ar}-\text{CCl}_4$  теряется на упругие столкновения между электронами, атомами и молекулами, а лишь небольшая часть этой энергии тратится на возбуждение, ионизацию и диссоциацию частиц плазмы. Образующиеся при этом атомы аргона в возбужденных состояниях, положительные ионы аргона и отрицательные ионы хлора, а также незаряженные продукты распада молекул  $\text{CCl}_4$  (радикалы) в плазме являются исходными частицами для образования молекул  $\text{ArCl}(B)$  и  $\text{Cl}_2(D')$ . Поэтому важное значение имеет знание эффективности образования первичных возбужденных и ионизированных частиц в исследуемом разряде и некоторые параметры плазмы, от которых зависят выходные характеристики и эффективность работы УФ–ВУФ-лампы.

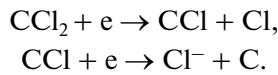
Электроны с повышенной энергией при неупругом взаимодействии с атомами аргона приводят к их возбуждению и ионизации [15–19]:



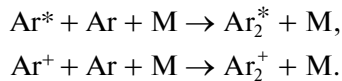
Отрицательные ионы хлора, важные для образования  $\text{ArCl}(B)$  и  $\text{Cl}_2(D')$  в реакциях ион-ионной рекомбинации образуются в результате процессов диссоциативного прилипания электронов к молекулам фреона [14, 20–25]:



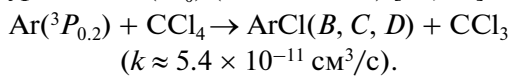




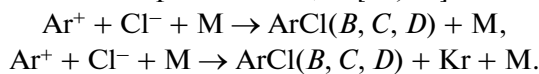
Экимерные молекулы ( $\text{Ar}_2^*$ ) и молекулярные ионы аргона ( $\text{Ar}_2^+$ ) образуются в результате следующих реакций:



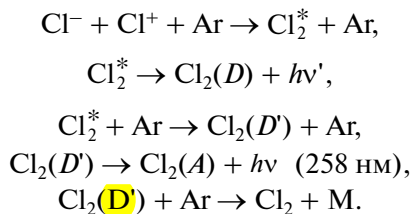
Эксплексная молекула  $\text{ArCl}^*$  может образоваться в результате “гарпунной” реакции (преимущественно при пониженных давлениях смеси) [12, 13, 20, 21, 25]. В этом случае в образовании молекул  $\text{ArCl}$  ( $B$ ,  $C$ ) принимают участие атомы аргона, находящиеся на нижнем метастабильном уровне  $\text{Ar}(^3P_2)$  с энергией 11.5 эВ, за образование молекул  $\text{ArCl}(D)$  отвечает энергетический уровень  $\text{Ar}(^3P_0)$  ( $\varepsilon = 11.72$  эВ) [20, 25]:



При большой плотности ионов в плазме и повышенном давлении рабочей смеси эксплексные молекулы эффективно образуются в реакции ион-ионной рекомбинации [12, 13]:



При повышенном давлении рабочей смеси, что характерно для исследуемого барьерного разряда, образование и распад возбужденных молекул хлора происходит в результате следующих реакций [26]:



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование выходных характеристик двухволновой УФ–ВУФ-лампы на основе полос молекулы хлора и хлорида аргона показало, что лампа работает на системе полос 175 нм хлорида аргона и 258 нм молекулы хлора; для получения максимальной интенсивности излучения  $B \rightarrow X$  полосы молекулы  $\text{ArCl}$  в двухволновом режиме работы лампы оптимальное парциальное давление паров фреона находится в диапазоне 120–220 Па, а для полосы 258 нм — в диапазоне 180–220 Па; оптимальное парциальное давление аргона находилось в диапазоне 6–8 кПа; средняя мощность излучения лампы при частоте следования импульсов 80 Гц составляла 1.0 Вт; ресурс работы лампы в диапазоне частот 40–150 Гц достигал  $10^6$  импульсов; вариацией давления и парциального со-

става лампы возможно управление ее спектром излучения в диапазоне длин волн 170–260 нм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бойченко А.М., Ломаев М.М., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Ультрафиолетовые и вакуумно-ультрафиолетовые эксилампы: физика, техника и применение. Томск: SST, 2011. 512 с.
2. *Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Излучение молекул  $\text{Cl}_2^*$  в барьерном разряде // Квант. электроника. 2008. Т. 38. № 8. С. 791.
3. *Шуаибов А.К., Чигинь В.И., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Горун П.П., Обуховский Р.О.* Эмиссионные характеристики и электронные кинетические коэффициенты плазмы поперечного объемного разряда в смеси тяжелых инертных газов с молекулами хлора // ЖТФ. 2010. Т. 80. № 5. С. 87.
4. *Zhang J.-Y., Boyd I.W.* Multi-Wavelength Excimer Ultraviolet Sources from a Mixture of Krypton and Iodine in a Dielectric Barrier Discharge // Appl. Phys. B. 2000. V. 71. P. 177.
5. *Xiaobo Zhuang, Qiuyi Han, Haojun Zhang, Xiangfen Feng et al.* The Efficiency of Coaxial  $\text{KrCl}^*$  Excilamps // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2010. V. 43. P. 205202.
6. *Erofeev M.V., Tarasenko V.V.*  $\text{XeCl}^-$ ,  $\text{KrCl}^-$ ,  $\text{XeBr}^-$  and  $\text{KrCl}$ -Excilamps of the Barrier Discharge with the Nanosecond Pulse Duration of Radiation // J. Phys. D.: Appl. Phys. 2006. V. 39. P. 3609.
7. *Шуаибов А.К., Гомоки З.Т., Миня А.И., Шевера И.В.* Эмиссионные характеристики ультрафиолетового излучателя с накачкой барьерным разрядом на смесях криптона с малоагрессивными галогеносодержателями // Опт. и спектр. 2013. Т. 114. № 2. С. 38.
8. *Шуаибов А.К., Малинина А.А.* Эмиссионные характеристики и параметры плазмы короткого тлеющего разряда в смеси аргона с элегазом // ТВТ. 2011. Т. 49. № 4. С. 505.
9. *Шуаибов А.К., Миня А.И., Грицак Р.В., Гомоки З.Т.* Коротковолновый излучатель на системе полос молекул хлорида аргона (175 нм) и хлора (258 нм) с наносекундным барьерным разрядом // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 1. С. 155.
10. *Битюрин В.А., Григоренко А.В., Ефимов А.В., Климов А.И. и др.* Спектральный и кинетический анализ газоразрядной гетерогенной плазмы в потоке смеси  $\text{Al}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ar}$  // ТВТ. 2014. Т. 52. № 1. С. 3.
11. *Ефремов А.М., Довлятина А.А., Светцов В.И.* Электрофизические параметры и состав плазмы в смесях  $\text{HCl}-\text{N}_2$  // ТВТ. 2013. Т. 51. № 1. С. 6.
12. *Gundel L.A., Setser D.W., Clyne M.A.A.* Rate Constants for Specific Product Channels from Metastable  $\text{Ar}(^3P_{2,0})$  Reactions and Spectrometer Calibration in the Vacuum Ultraviolet // J. Chem. Phys. 1976. V. 64. № 11. P. 4390.
13. *Tsuji M., Furusawa M., Mizuguchi T., Muraoka T., Nishimura Y.* Dissociative Excitation of  $\text{CF}_4$ ,  $\text{CCl}_4$ , and Chlorofluoromethanes by Collisions with Argon and

- Helium Active Species // *J. Chem. Phys.* 1992. V. 97. № 1. P. 245.
14. *Пикулев А.Л., Цветков В.М.* Исследование законов подобия газового разряда при возбуждении смеси  $Kr/CCl_4$  барьерным разрядом // *ЖТФ.* 2010. Т. 80. № 1. С. 45.
  15. *Авдеев С.М., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф.* Оптические характеристики плазмы эксиламп барьерного разряда на димерах галогенов  $I_2^*$ ,  $Cl_2^*$ ,  $Br_2^*$  // *Опт. и спектр.* 2007. Т. 103. № 4. С. 546.
  16. *Авдеев С.М., Ерофеев М.В., Соснин Э.Л., Тарасенко В.Ф.* Планарные эксилампы барьерного разряда // *Оптика атмосферы и океана.* 2008. Т. 21. № 8. С. 725.
  17. *Boyd I.W., Liaw I.I.* Development and Application of UV Excimer Lamps from 354–126 nm // *Proc. SPIE 6261. High-Power Laser Ablation VI.* Taos, New Mexico, United States, 2006. P. 626104.
  18. *Bassett N.L., Economou D.J.* Effect of  $Cl_2$  Additions to an Argon Glow Discharge // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 75. № 4. P. 1931.
  19. *Словецкий Д.И.* Возбужденные атомы и молекулы в физико-химических процессах и диагностике неравновесной плазмы // *V Междун. симп. по теор. и прикл. плазмохимии.* Иваново, Россия, 2008. С. 58.
  20. *Tsuji M., Ide M., Muraoka T., Nishimura Y.* Formation of  $ArCl(B,C)$ ,  $Ar(^3P_2)$ , and  $Cl$  by the Threebody Ionic Recombination Reaction of  $Ar + (^2P_{3/2}) + Cl^- + Ar$  // *J. Chem. Phys.* 1994. V. 101. № 1. P. 328.
  21. *Balamuta J., Golde M.F., Moyle A.M.* Product Distributions in the Reactions of Excited Noble Gas Atoms with Halogencontaining Compounds // *J. Chem. Phys.* 1985. V. 82. № 7. P. 3169.
  22. *Tonkyn R.G., Barlow S.E., Orlando T.M.* Destruction of Carbon Tetrachloride in a Dielectric Barrier/Packedbed Corona Reactor // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 80. № 9. P. 4877.
  23. *Ulejczyk B., Krawczyk K., Młotek M., Schmidt-Szałowski K.* Decomposition of Carbon Tetrachloride in the Reactor of Dielectric Barrier Discharge with Different Power Supplies // *Europ. Phys. J. Appl. Phys.* 2013. V. 61. P. 24324.
  24. *Kim H.J., Choa C.H., Kimb H., Lee S.C.* Decomposition of Carbon Tetrachloride in Air Plasma Using Glow Discharge Atomic Emission Spectrometry // *Analyst.* 1998. V. 123. P. 607.
  25. *Sommerer T.J., Kushner M.J.* Monte Carlo-Fluid Model of Chlorine Atom Production in  $Cl_2$ ,  $HCl$  and  $CCl_4$  Radio-Frequency Discharges for Plasma Etching // *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1992. V. 10. № 5. P. 2179.
  26. *Nee J.B., Hubinger S.* Pressure Effects on the  $Cl_2(D'-A')$  Transition at 258 nm // *Chem. Phys.* 1996. V. 211. P. 403.