

04;07;12

Характеристики и параметры плазмы коротковолновой лампы низкого давления

© А.К. Шуаибов, И.В. Шевера, А.А. Малинина

Ужгородский национальный университет, Украина
E-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

Поступило в Редакцию 13 февраля 2008 г.

Представлены результаты исследования характеристик и электронных кинетических коэффициентов газоразрядной эксиплексно-галогенной лампы на смеси аргона с хлором ($p = 0.5\text{--}10$ кПа). Лампа излучает на системе уширенных электронно-колебательных полос молекул ArCl (175 nm) и хлора (200, 258 nm), которые, перекрываясь между собой формируют единый континуум в спектральном диапазоне 160–260 nm. Наиболее оптимальными для лампы являются смеси $p(\text{Ar})\text{--}p(\text{Cl}_2) = (2 \dots 4)\text{--}(0.15 \dots 0.30)$ кПа. Средняя мощность коротковолнового излучения лампы 1–2 W при КПД 5%.

Функции распределения электронов по энергии и параметры газоразрядной плазмы рассчитывались для оптимизированной в эксперименте смеси в диапазоне изменения параметра E/P от 1 до $200 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ путем решения кинетического уравнения Больцмана. На основании функций распределения электронов по энергиям рассчитаны транспортные характеристики электронов плазмы, удельные потери мощности разряда на основные элементарные процессы и константы скоростей электронных процессов.

PACS: 52.80.Nc

Лампа низкого давления с возбуждением продольным тлеющим разрядом смеси аргон–хлор, кроме излучения на системе полос молекулы хлора с максимумами при 200 и 258 nm [1], излучает и в области вакуумного ультрафиолета (до 160 nm). Это связано с образованием эксиплексной молекулы $\text{ArCl}(B)$, которая распадается с излучением полосы 175 nm [2,3]. В [1] приведены результаты систематических исследований характеристик эксиплексно-галогенной лампы постоянного тока на основе сложных многокомпонентных смесей типа $\text{Ar}\text{--}\text{Kr}(\text{Xe})\text{--}\text{Cl}_2$, $\text{Ar}\text{--}\text{Kr}\text{--}\text{Xe}\text{--}\text{Cl}_2$. В таких излучателях, за счет уширения и перекрытия полос монохлоридов тяжелых инертных газов и молекул хлора, формируются УФ–ВУФ континуумы в спектральном диапазоне 160–320 nm.

Характеристики и параметры плазмы газоразрядного УФ излучателя на электронно-колебательных полосах молекул хлора, который работает на смеси He–Cl₂, приведены в работах [4,5].

В настоящей работе представлены основные характеристики УФ–ВУФ лампы на системе полос молекулы хлора и хлорида аргона. Приводятся также результаты расчета параметров плазмы тлеющего разряда на оптимальной по составу смеси Ar–Cl₂ в зависимости от параметра E/P , где E — напряженность электрического поля, P — давление газа.

Продольный тлеющий разряд зажигался в цилиндрической разрядной трубке из высококачественного кварца. Внутренний диаметр трубки составлял 5 mm, а расстояние между анодом и катодом — 100 mm. Разрядная трубка с открытыми торцами устанавливалась в буферную камеру объемом 10 l, которая вакуумноплотно пристыковывалась к вакуумному монохроматору. Один из открытых торцов трубки находился перед входной щелью монохроматора, которая отделялась от буферной камеры тонким окном из фторида лития. Система регистрации излучения и условия эксперимента детально описаны в [1].

Тлеющий разряд в смеси Ar–Cl₂ существовал в форме слабotoчной и сильноточной стадий, переход между которыми осуществлялся при токах разряда 1–2 mA. Наибольшая эффективность лампы наблюдалась на подномальной стадии тлеющего разряда (при токах 1–5 mA), но средняя мощность излучения была при этом низкой. С увеличением тока разряд переходил в нормальный режим горения, при котором спад напряжения на электродах трубки практически не зависел от тока [6]. Для тлеющего разряда в смеси $p(\text{Ar})-p(\text{Xe}) = 2.8-0.28$ kPa потенциал зажигания составлял 3.6 kV, а напряжение устойчивого горения в нормальном режиме — 2.0 kV. Увеличение парциального давления хлора до 0.60 kPa приводило к увеличению потенциала зажигания до 5.6 kV, а напряжения нормального горения до 2.5 kV. При малых токах тлеющего разряда существенным было расслоение плазмы по радиусу трубки. Так при токах разряда 2–5 mA в центре трубки наблюдалось яркое плазмообразование диаметром 1–2 mm, а при увеличении тока до 30 mA плазма заполняла почти весь внутренний объем трубки. Поскольку в рабочих смесях в довольно большом количестве присутствовали молекулы хлора, то при таких условиях расслоение разряда связано с разными скоростями диффузии электронов и отрицательных ионов, что

приводило к формированию ион-ионной плазмы в центральной части разрядной трубки [7].

Спектр излучения тлеющего разряда состоял из уширенных полос молекул хлора с максимумами при 258 и 200 nm, а также полосы 175 nm $\text{ArCl}(B-X)$. Из-за уширения электронно-колебательных полос излучения молекул Cl_2 и ArCl при низких давлениях рабочей смеси, они формировали единый континуум в диапазоне спектра 160–260 nm. Оптимизация средней мощности излучения этого УФ–ВУФ континуума показала, что оптимальными являются смеси $p(\text{Ar})-p(\text{Cl}_2) = (2.0 \dots 4.0) - (0.15 \dots 0.3)$ kPa при величине параметра $E/P = 8-12 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$. Средняя мощность излучения лампы со всей боковой поверхности разрядной трубки составляла 1–2 W при КПД порядка 5%.

Электронные кинетические коэффициенты (ЭКК) рассчитывались для разряда в смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2 = 83-17\%$, которая по данным эксперимента близка к оптимальным средам УФ–ВУФ лампы. Расчеты ЭКК проводились путем решения кинетического уравнения Больцмана для функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ). При выполнении расчетов использовалась программа [8]. На основе рассчитанных ФРЭЭ в диапазоне изменения параметра $E/P = 1-200 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$, определялись коэффициенты подвижности и диффузии, средняя и характеристическая энергии электронов плазмы, удельные потери мощности разряда на основные элементарные процессы, а также коэффициенты ионизации и диссоциативного прилипания. ЭКК рассчитывались по формулам, приведенным в работе [9]. Диапазон изменения величины параметра E/P включал все E/P , реализованные экспериментально в процессе оптимизации выходных характеристик лампы. При решении кинетического уравнения Больцмана учитывались процессы упругого рассеяния электронов, диссоциативного прилипания, колебательного возбуждения — Cl_2 ($v = 1$), где v — номер колебательного уровня в пределах основного электронного состояния молекулы хлора, возбуждения электронных состояний атома аргона и молекулы хлора ($B^3\Pi_i, C^1\Pi_i, B^3\Pi_i + C^1\Pi_i$), а также ионизации молекул хлора и атомов аргона. Как установлено в [10], при низких степенях ионизации (10^{-6} и меньше) учет сверхупругих процессов и кулоновских столкновений практически не влияет на вид ФРЭЭ и величину ЭКК, поэтому эти процессы нами не учитывались.

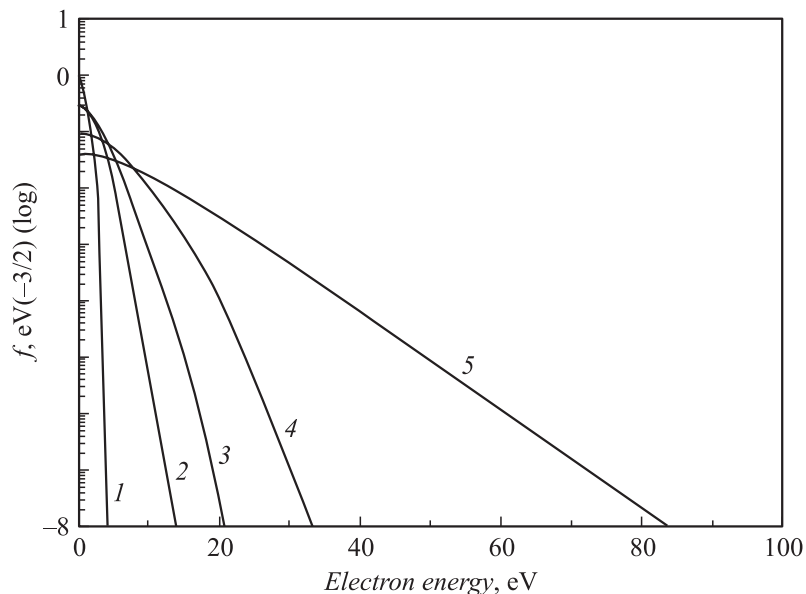


Рис. 1. Функции распределения электронов по энергии в разряде на смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2 = 83-17\%$ при разных параметрах E/P : 1 (1), 10 (2), 20 (3), 50 (4) и $200 \text{ V}/(\text{cm} \cdot \text{Torr})$ (5).

Характерный вид ФРЭЭ в разряде на смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2 = 83-17\%$ в диапазоне изменения параметра E/P от 1 до $200 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ представлен на рис. 1. Увеличение параметра E/P приводит к росту энергии наиболее быстрых электронов разряда и значительному спаду плотности электронов с энергиями в диапазоне 1–5 eV (примерно 10–30 раз). Для параметров $E/P = 6-10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$, которые близки к оптимальным, основное количество электронов плазмы имело энергию в диапазоне 1–10 eV. Из распределения удельных потерь мощности разряда в смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ на основные элементарные процессы (рис. 2, а: потери, просуммированные по однопипным процессам) следует, что в диапазоне $E/P = 5-20 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ преобладают потери на возбуждение электронных состояний молекулы хлора. Потери, связанные с возбуждением атома аргона, проявляются только при $E/P > 20 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$.

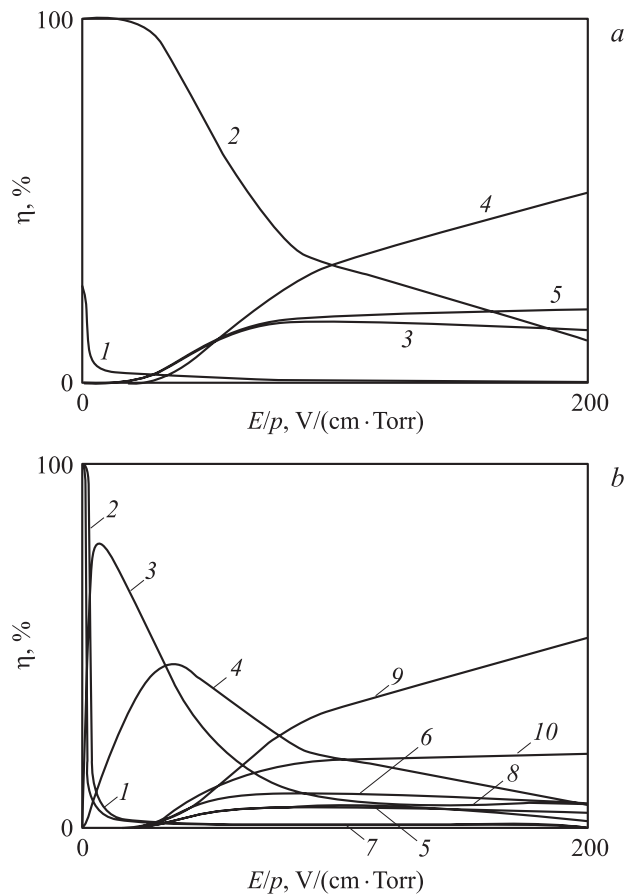


Рис. 2. Зависимость удельных потерь мощности разряда на элементарные процессы в смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2 = 87-17\%$ от параметра E/P : *a* — потери, просуммированные по однотипным процессам: диссоциативное прилипание (1), суммарное возбуждение электронных уровней молекулы хлора электронами (2), суммарное возбуждение атома аргона (3), ионизация аргона (4), ионизация хлора (5); *b* — потери по отдельным элементарным процессам: диссоциативное прилипание (1), колебательное возбуждение молекул хлора (2), возбуждение электронных состояний молекулы хлора $B^3\Pi_i$ (3), $C^1\Pi_i$ (4), $(B^3\Pi_i + C^1\Pi_i)$ (5), возбуждение первых 13 возбужденных уровней аргона (6), возбуждение первых двух уровней аргона (7), возбуждение резонансного уровня аргона (8), ионизация аргона (9) и ионизация молекулы хлора (10).

При $E/P = 80-100 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ они достигают максимума и при дальнейшем росте параметра E/P плавно уменьшаются. Наиболее существенные потери мощности разряда на ионизацию связаны с ионизацией атома аргона. При $E/P = 10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ они сравнимы с потерями мощности разряда на возбуждение молекул хлора. Удельные потери на ионизацию молекул хлора при $E/P = 100-200 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ в 2–3 раза ниже, чем на ионизацию атома аргона. Более детальное распределение удельных потерь мощности разряда по основным элементарным процессам представлено на рис. 2, *b*. Потери на колебательное возбуждение молекул хлора существенны только при $E/P = 1-5 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$. Потери на образование отрицательных ионов хлора сдвинуты, по сравнению с потерями на колебательное возбуждение хлора, в область еще меньших E/P . Они быстро уменьшались с ростом E/P . При $E/P = 5-10 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ превалируют потери мощности разряда на возбуждение электронно-колебательных состояний молекулы хлора, которые распадаются с излучением полос с максимумами при 258 и 200 nm. Допуская, что образование молекул $\text{ArCl}(B)$ происходит в результате „гарпунной“ реакции: $\text{Ar}(m) + \text{Cl}_2$ (или $\text{Cl}_2(v=1)$) = $\text{ArCl}(B) + \text{Cl}$, видно, что при оптимальной для работы лампы величине параметра E/P процесс образования возбужденных атомов аргона малоэффективен. Вклад же реакции ион-ионной рекомбинации в образование молекул $\text{ArCl}(B)$: $\text{Ar}^+ + \text{Cl}^- + (\text{Ar}) = \text{ArCl}(B) + (\text{Ar})$ в тлеющем разряде низкого давления небольшой из-за уменьшения скорости реакции рекомбинации с давлением и низкой эффективностью ионизации в области оптимальных E/P .

Средняя энергия электронов в разряде практически линейно увеличивалась в диапазоне $E/P = 1-50 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$ примерно от 0.1 до 8 eV, а при более высоких E/P происходило насыщение (вставка на рис. 3, *a*). Коэффициенты ионизации аргона и хлора увеличивались в диапазоне $E/P = 30-200 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$, а коэффициент диссоциативного прилипания электронов к молекулам хлора уменьшался при увеличении параметра E/P (рис. 3).

Таким образом, показано, что УФ–ВУФ излучатель на смеси $\text{Ar}-\text{Cl}_2$ с возбуждением тлеющим разрядом излучает континуум в спектральном диапазоне 160–310 nm, который формируется на основании полос молекул хлора и $B-X$ полосы ArCl . Наиболее оптимальными являются смеси $p(\text{Ar})-p(\text{Xe}) = (2.0 \dots 4.0) - (0.15 \dots 0.3) \text{ kPa}$

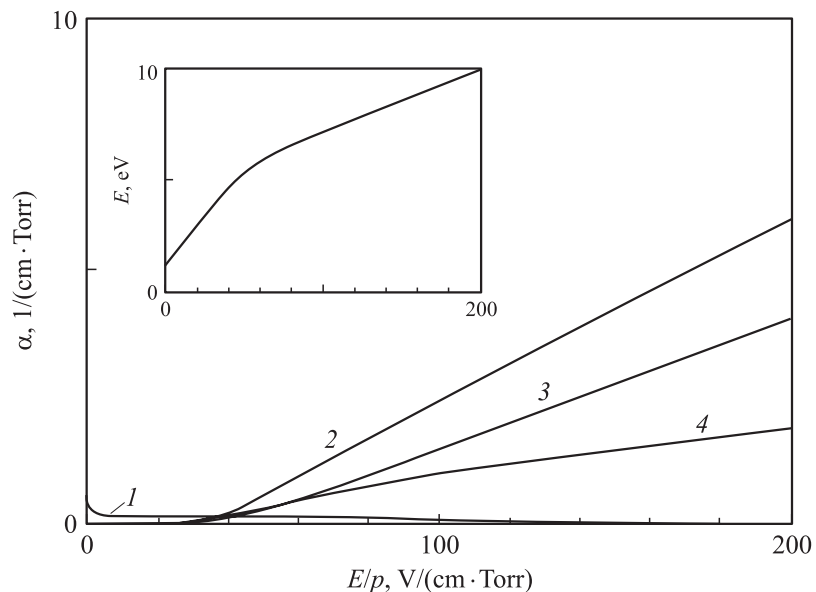


Рис. 3. Зависимость средней энергии электронов (a), коэффициентов прилипания и ионизации (b) от величины параметра E/P : коэффициент диссоциативного прилипания (1), суммарный коэффициент ионизации (2), коэффициент ионизации аргона (3) и коэффициент ионизации молекул хлора (4).

при $E/P = 8-12 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Torr}^{-1}$. Средняя мощность УФ–ВУФ излучения лампы составляла $1-2 \text{ W}$ при КПД порядка 5%. Полученные в процессе численного моделирования ЭКК качественно объясняют распределение излучения в спектре и могут быть использованы при расчетах кинетики процессов и выходных характеристик эксимерно-галогенной лампы.

Список литературы

- [1] Шуайбов А.К., Шевера И.В. // ЖТФ. 2007. Т. 77. В. 9. С. 93–101.
- [2] Шуайбов А.К., Шимон Л.Л., Дашенко А.И., Шевера И.В. Электроразрядная лампа эксимерная лампа низкого давления. Патент UA 47626 А. Приоритет от 25.05.2001, опубликован 25.07.2002. Б.И. № 7.

- [3] Шуаибов А.К., Дашенко А.И., Шевера И.В. // ТВТ. 2001. Т. 39. № 5. С. 833–835.
- [4] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Волович П.Н. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 1. С. 33–37.
- [5] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Малинина А.А. // ЖПС. 2008. Т. 75. № 1. С. 121–124.
- [6] Райзер Ю.П. // Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
- [7] Цендин Л.Д. // ЖТФ. 1985. Т. 55. В. 12. С. 2318–2322.
- [8] <http://www.siglo-kinema.com>.
- [9] Шевера И.В., Шуаибов А.К., Герц С.Ю., Малинин А.Н. М.: 1981. Деп. ВИНТИ 06.08.81. № 4509.
- [10] Автаев С.В., Кайрыев Н.Ж., Кудумбаев Э.А., Скорняков А.Б. // XXXIII Международная (Звенигородская) конф. по физ. плазмы и УТС. 2006. Тез. докл. С. 1.