

04;07;12

Импульсно-периодический объемный разряд низкого давления на смеси аргон/хлор, иницируемый прилипательной неустойчивостью

© А.К. Шуайбов

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

(Поступило в Редакцию 19 марта 2002 г.)

Исследованы условия зажигания и характеристики импульсно-периодического объема разряда в системе сферический анод–плоский катод. Рабочей средой служили смеси Ar/Cl_2 ($P \leq 2.0$ кПа), используемые в эксимерно-галогенной лампе на системе молекулярных полос $175 \text{ nm ArCl}(B-X)$, $257 \text{ nm Cl}_2(D'-A')$ и $195\text{--}200 \text{ nm Cl}_2^{**}$. При межэлектродном расстоянии 3 cm , подаче на анод постоянного напряжения ($U_{ch} \leq 1.0 \text{ kV}$) и заполнении разрядного объема хлором или газовыми смесями $\text{Ar}/\text{Cl}_2 = 0.1\text{--}2.0/0.04\text{--}0.12$ кПа в межэлектродном объеме зажигался устойчивый импульсно-периодический разряд с частотой следования импульсов $1\text{--}50 \text{ kHz}$. За счет развития прилипательной неустойчивости плазмы (при которой значительную роль играют процессы образования, распада и диффузии отрицательных ионов Cl_2^- , Cl^-) образуется единичный плазменный домен грушевидной формы со средним диаметром $0.2\text{--}3.5 \text{ cm}$.

Показано, что исследуемая плазма может служить в качестве активной среды эксимерно-галогенной лампы низкого давления излучающей в спектральном диапазоне $180\text{--}270 \text{ nm}$. Такая импульсно-периодическая лампа не предполагает использования импульсного источника питания, основанного на работе емкостных или индуктивных накопителей энергии с традиционными коммутаторами (разрядниками, тиратронами и др.), что значительно расширяет область ее использования. Приводятся результаты оптимизации яркости полос излучения молекул ArCl и Cl_2^{**} в зависимости от величины давления и состава смеси Ar/Cl_2 , а также среднего тока разряда. Представлены результаты исследования влияния состава рабочей смеси на динамику зажигания и излучения плазмы объемного разряда.

1. Тлеющий разряд на смесях $\text{Ar}(\text{Kr}, \text{Xe})/\text{Cl}_2$ низкого давления ($P \leq 2$ кПа), получаемый в длинных стеклянных трубках разных размеров и конструкций, широко используется в эксимерных лампах УФ–ВУФ диапазона спектра [1–5]. Конструктивно они значительно проще ламп с микроволновой [6] или плазмодинамической накачкой [7,8] и позволяют получать непрерывное УФ–ВУФ излучение. Величина напряжения на электродах у таких ламп может достигать $5\text{--}10 \text{ kV}$, а уже при разрядном токе $I_{ch} \geq 20\text{--}30 \text{ mA}$ необходимо использование принудительного охлаждения электродов и самой разрядной трубки. Кроме активной среды цилиндрической формы (плазмы положительного столба тлеющего разряда постоянного тока) значительный интерес представляют разработки планарных ламп с системой электродов, не ограниченной диэлектрическими стенками. В работе [9] впервые сообщалось о разработке и приведены характеристики планарной лампы низкого давления на основе излучения молекулы XeCl^* ($\lambda = 236/308 \text{ nm}$), разряд в которой зажигался при использовании источника постоянного напряжения. Применялись система

электродов сплошной катод–сетчатый анод с межэлектродным расстоянием 3 cm и газовые смеси $\text{Xe}/\text{Cl}_2(\text{HCl})$ при давлении $P \leq 2.0$ кПа. Показано, что эффективность излучения данной лампы в угол 4π превышала 4% , а величина постоянного напряжения на аноде $\leq 1.0 \text{ kV}$. Основное внимание в работе было сосредоточено на исследовании пространственных характеристик плазмы, а временные характеристики разряда и излучения плазмы не изучались.

В таких газовых средах значительную роль в формировании объемного разряда играют процессы прилипания, отлипания электронов, диффузии отрицательных ионов и развитие прилипательной неустойчивости плазмы [10–12], что делает проблематичным существование стационарного тлеющего разряда и создание непрерывных эксимерно-галогенных ламп низкого давления.

В настоящей работе приводятся исследования характеристик объемного разряда в смеси аргон/хлор, получаемого при питании короткого разрядного промежутка от источника постоянного напряжения.

2. В эксперименте контролировались пространственные характеристики разряда и исследовались усредненные вольт-амперные характеристики (ВАХ), спектры излучения плазмы в диапазоне $130\text{--}350 \text{ nm}$, осциллограммы тока и суммарного излучения в спектральной области $200\text{--}700 \text{ nm}$, а также зависимость интенсивности излучения в максимуме полос молекул ArCl и хлора от величины среднего разрядного тока.

Система электродов сферической анод–плоский катод устанавливалась в металлическую разрядную камеру объемом 10 l , которая была герметически соединена с вакуумным монохроматором (схема Сейя–Намиоки, спектральное разрешение 0.7 nm) через окно из LiF . В качестве фотоприемника в вакуумном спектрометре использован фотомножитель ФЭУ-142 с LiF окном.

Калибровка спектрометра проводилась по континууму молекулы водорода в области 165–350 nm, а в спектральном диапазоне 130–165 nm — аппроксимацией кривой спектральной чувствительности из областей $\lambda \geq 165$ nm. За противоположным от входной щели вакуумного монохроматора смотровым окном из кварца был установлен импульсный фотоумножитель „Фотон“ с областью спектральной чувствительности 200–700 nm, который соединялся с импульсным осциллографом С1-99. Временное разрешение системы регистрации импульсов излучения 10 ns. Система электродов (рис. 1) состояла из массивного анода диаметром 7 см и катода диаметром 9 см, изготовленных из дюралюминия и установленных на расстоянии 3 см один от другого. Радиус закругления рабочей поверхности анода составлял 3 см, катод был плоским. Постоянное напряжение ($U_{ch} \leq 1$ kV) подавалось на анод через ограничительное сопротивление 10 k Ω . Средний ток разряда изменялся в диапазоне 2–50 mA, а давление газовых смесей находилось в пределах 40–2000 Pa.

3. Характерный вид поперечного сечения разрядного устройства и образующейся в нем плазмы на смесях Ar/Cl₂ приведен на рис. 1. При разряде в смесях низкого давления с минимальным содержанием хлора наблюдалось формирование конусообразного плазмообразования, плотно прилегающего к средней части рабочей поверхности анода и имеющего четкую сферическую границу вблизи поверхности катода. Диаметр основы на аноде достигал 1.0–1.5 см, а в области катода он увеличивался в 1.5–2.0 раза. В средней части плазмообразования наблюдался более яркий сегмент, также имеющий четкую сферическую границу у поверхности катода. Увеличение давления газовых смесей и содержания в них хлора приводило к сдвигу точки фиксации плазмообразования на периферийную часть поверхности анода,

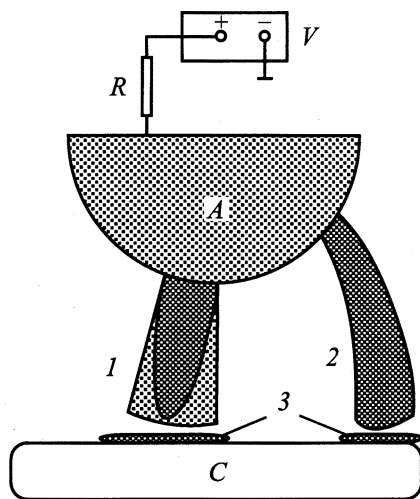


Рис. 1. Схема разрядного устройства и вид разрядной плазмы на смесях аргона с хлором при крайних парциальных давлениях Ar и Cl₂ в смесях: $P(\text{Ar})/P(\text{Cl}_2) = 2.00/0.12$ (1) и $1.33/1.2$ kPa (2), где A — анод, C — катод, 3 — отрицательное катодное свечение, V — высоковольтный выпрямитель.

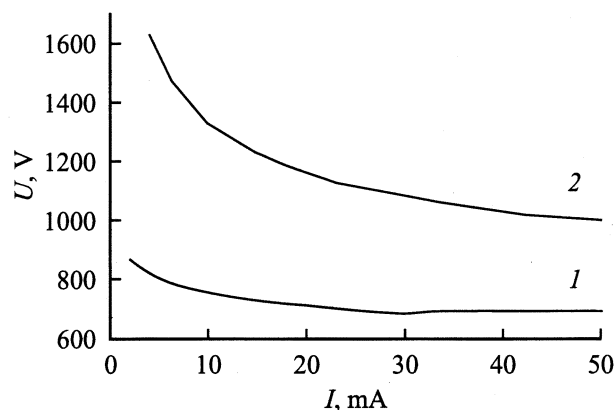


Рис. 2. Статистические ВАХ объемного разряда в смесях $P(\text{Ar})/P(\text{Cl}_2) = 1.33/0.12$ (1) и $1.33/1.2$ kPa (2).

уменьшению его диаметра на аноде до 0.2 см, а вблизи катода до 0.5 см. Во всех экспериментах наблюдалось темное пространство, размер которого увеличивался с 0.5 до 5.0 mm с увеличением давления смеси Ar/Cl₂ и особенно содержания хлора в ней. Диаметр отрицательного тлеющего свечения в 1.3–1.5 раз превышал диаметр катодной части плазмообразования. Такого вида единичные плазмообразования на основе электроотрицательных газовых сред называют плазменными доменами или автосолидонами [13,14].

4. Статические ВАХ разряда в смесях Ar/Cl₂ при фиксированном давлении Ar и крайних значениях $P(\text{Cl}_2)$ (0.12 и 1.2 kPa) представлены на рис. 2. Как и для продольного разряда постоянного тока на смеси Ar/Cl₂ [4], на усредненных ВАХ импульсно-периодического объемного разряда можно выделить поднормальную стадию горения (при $I_{ch} \leq 20$ mA) и нормальную — при более высоком разрядном токе. Увеличение парциального давления хлора в смеси на порядок приводило к значительному росту величины напряжения на разрядном промежутке (рис. 2) и увеличению электрической мощности объемного разряда в 1.5–2.0 раза.

5. Спектры излучения плазмы объемного разряда приведены на рис. 3. Интенсивность излучения плазмы в области $\lambda \geq 400$ nm не превышала 5–10% от интенсивности в УФ–ВУФ области длин волн, что проверялось в отдельном эксперименте по регистрации суммарного излучения разряда при помощи фотоумножителя через светофильтр. Как следует из рис. 3, плазма автосолитонов — это селективный источник излучения в диапазоне 170–270 nm. Вид спектров подобен полученному нами для плазмы продольного тлеющего разряда в смеси Ar/Cl₂ [4,15]. Основными в спектрах излучения были молекулярные полосы 175 nm AgCl(B–X), 200 nm Cl₂^{**} и 257 nm Cl₂(D'–A'). Спектры на рис. 3 приведены с учетом относительной спектральной чувствительности вакуумного спектрометра. При малом парциальном давлении аргона и хлора (рис. 3, a) молекулярный спектр излучения представлен хорошо разрешенными электронно-колебательными полосами мо-

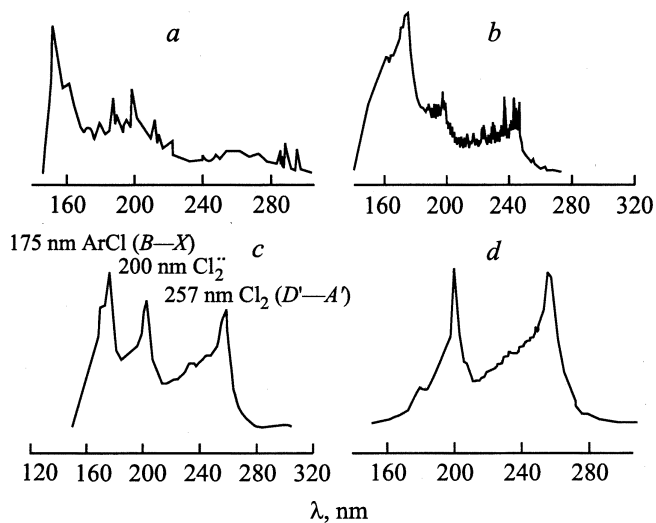


Рис. 3. Спектры излучения плазмы объемного разряда на смесях $P(\text{Ar})/P(\text{Cl}_2) = 0.20/0.12$ (a), $1.33/0.12$ (b), $1.33/0.27$ (c) и $1.33/1.20$ kPa (d).

лекулы хлора [16]. Расшифровка спектров излучения низкотемпературной плазмы хлора проводилась нами ранее для поперечного объемного разряда в хлоре [17] и практически полностью совпадает с результатами данного эксперимента. Молекулы хлорида аргона при этом не образуются и полоса 175 nm в спектре излучения отсутствует. Увеличение парциального давления аргона до 1.33 kPa (рис. 3, b) приводило к значительному увеличению яркости излучения полос хлора и появлению полосы 175 nm $\text{ArCl}(B-X)$. На полосах излучения молекулярного хлора сохраняется сильно выраженная структура. Зависимость эффективности образования молекул ArCl от величины $P(\text{Ar})$ имела резкий характер, поскольку они образовывались только в сравнительно узком диапазоне парциальных давлений аргона $0.8\text{--}1.33 \text{ kPa}$. Увеличение парциального давления хлора в смеси до 0.28 kPa (рис. 3, c) приводило к еще большему росту яркости излучения всех молекулярных полос хлора и хлорида аргона. Данная смесь была близкой к оптимальной для получения максимальной яркости суммарного УФ-ВУФ излучения плазмы. Рост $P(\text{Cl}_2)$ в рабочей смеси до 1.2 kPa приводил к незначительному уменьшению яркости излучения хлора и сильному тушению молекул $\text{ArCl}(B)$.

6. Одним из основных признаков проявления прилипательной неустойчивости низкотемпературной плазмы на основе электроотрицательных молекул является модуляция тока разряда и излучения плазмы во времени [11]. Как следует из рис. 4, для объемного разряда на смесях Ar/Cl_2 низкого давления реализуется импульсно-периодический режим зажигания разряда. Частота следования импульсов в зависимости от давления и состава рабочей смеси, а также среднего тока разряда находилась в диапазоне $1\text{--}50 \text{ kHz}$. Увеличение среднего тока разряда приводило, как правило, к росту частоты следования импульсов. На рис. 4 приведены наиболее

характерные (как правило, с максимальной величиной амплитуды измеряемой величины) осциллограммы тока и суммарного излучения плазмы. В действительности

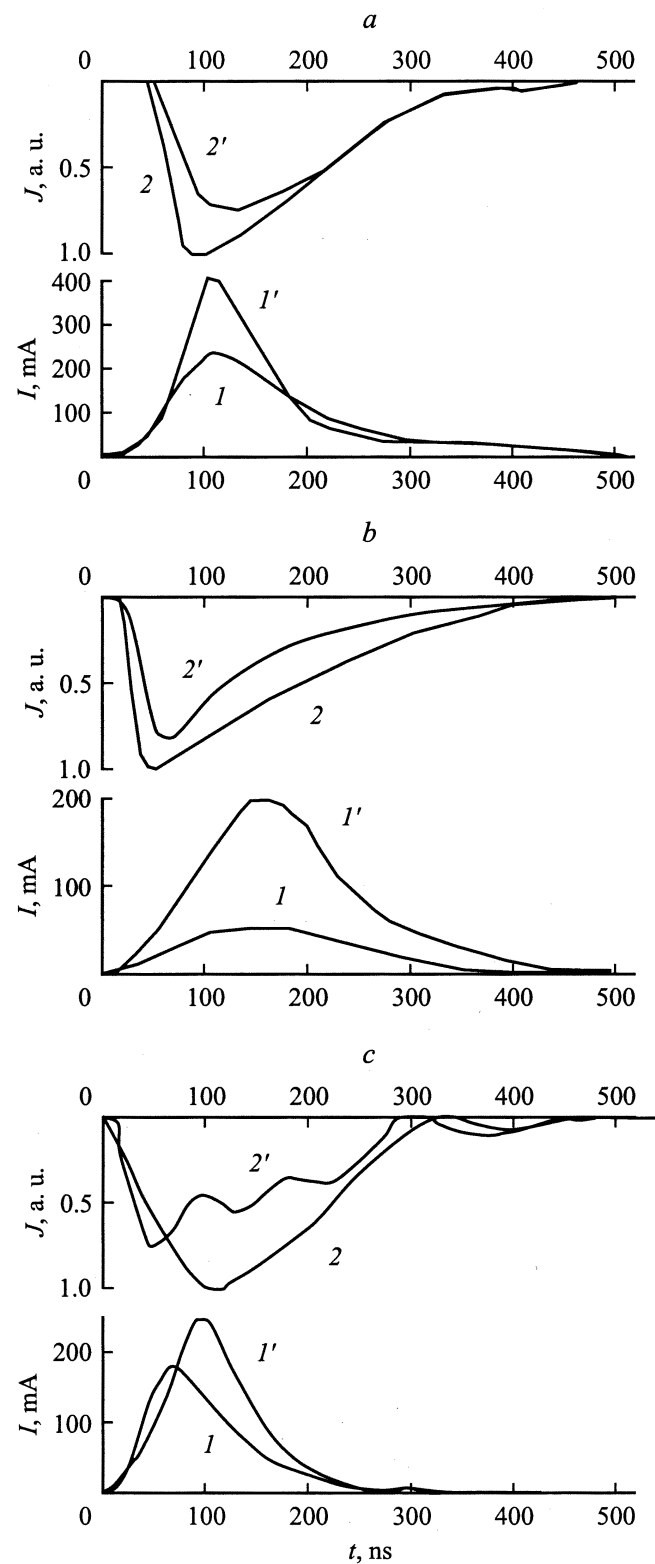


Рис. 4. Осциллограммы тока (I, I') и суммарного излучения плазмы ($2, 2'$) разряда на смесях $P(\text{Ar})/P(\text{Cl}_2) = 0.20/0.12$ (a), $1.33/0.12$ (b), $1.33/1.20 \text{ kPa}$ (c) при средних токах разряда 10 ($I, 2$) и 30 mA ($I', 2'$).

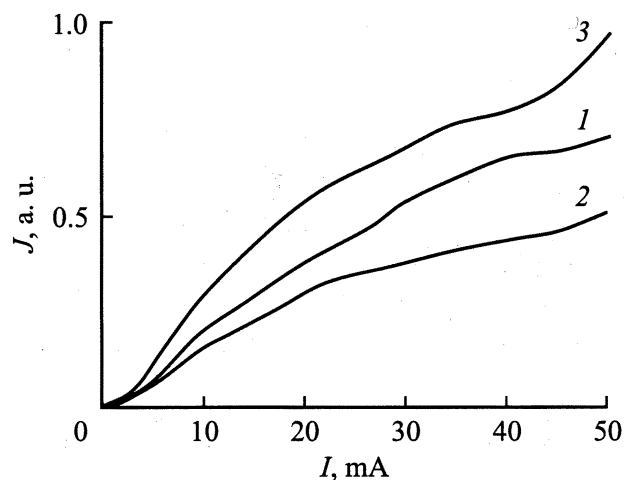


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения в максимумах полос с $\lambda = 175$ nm ArCl(B-X) (1), 200 nm Cl₂** (2) и 257 nm Cl₂(D'-A') (3) от величины среднего тока разряда на смесях $P(\text{Ar})/P(\text{Cl}_2) = 1.33/0.12$.

наблюдалось формирование автосолитонов с широким распределением амплитудных значений тока и фототока: $I; J_F = 0.3-0.9I^{\max}; J_F^{\max}$. Длительность импульсов тока разряда и излучения плазмы на 50%-ном уровне амплитудного значения находились в диапазоне 100–200 ns. В разряде на смеси Ar/Cl₂ низкого давления с малым парциальным давлением хлора (рис. 4, а) формирование плазменных автосолитонов и соответственно излучения плазмы происходило в области максимума тока объемного разряда. Увеличение же среднего тока с 10 до 30 mA для смесей всех составов приводило к увеличению амплитуды тока и уменьшению яркости суммарного излучения плазмы. Возрастание парциального давления аргона (рис. 4, б) приводило к расширению осциллограммы тока и уменьшению его амплитуды в два раза. Импульс излучения характеризовался при этом коротким передним фронтом и имел основной максимум уже на переднем фронте импульса тока. Длительность импульса излучения возрастала при этом на 20–30%. Рост парциального давления хлора в смеси при $P(\text{Ar}) = 1.33$ kPa (рис. 4) приводил к укорачиванию импульса тока до 100 ns и некоторому увеличению его амплитудного значения, особенно при $I_{ch} \leq 10$ mA. Мощность излучения плазмы в данном случае понижалась в 2.5 раза, а на осциллограмме излучения плазмы с длительностью по основанию 450 ns формировалась структура из трех максимумов. Импульс излучения формировался в области переднего фронта импульса тока накачки (при $I_{ch} \geq 30$ mA), а при малых средних токах разряда он сдвигался в область максимума импульса тока.

7. Зависимости интенсивности излучения в максимумах полос излучения молекул ArCl и Cl₂ от величины среднего тока разряда были возрастающими, что определялось увеличением амплитуды импульсов тока в

1.3–3.0 раза и в значительной степени ростом частоты повторения импульсов при увеличении среднего тока объемного разряда (рис. 5). Увеличение парциального давления хлора в смеси с 0.12 до 1.2 kPa приводило к росту интенсивности излучения полос хлора в 1.5–2.0 раза, но эксимерная молекула ArCl(B) испытывала сильное тушение и полоса с $\lambda = 175$ nm не давала вклада в суммарное УФ излучение плазмы.

8. Таким образом, исследование характеристик объемного разряда низкого давления на смеси аргон/хлор, получаемого в системе электродов не ограниченной диэлектрическими стенками при малом межэлектродном расстоянии ($d \leq 3$ cm) и при использовании источника постоянного напряжения показало, что объемный разряд существует исключительно в импульсно-периодическом режиме ($f = 1-50$ kHz). Возможна разработка импульсно-периодической эксимерно-галогенной лампы низкого давления для спектральной области 170–270 nm. Разработка соответствующих ламп с непрерывным режимом излучения невозможна в связи с развитием прилипательной неустойчивости объемного разряда. Контрольный эксперимент, проведенный при зажигании объемного разряда на смеси ксенон/хлор при общем давлении $P \leq 1.0$ kPa, показал, что и в данном случае чисто непрерывный режим излучения разряда не достигается, но в разряде существует непрерывная составляющая тока и излучения плазмы, величина которой сильно зависит от суммарного давления, состава смеси и среднего тока объемного разряда. Для получения максимальной яркости УФ-ВУФ излучения плазмы объемного разряда длительностью $\tau = 100-300$ ns оптимальными являются смеси Ar/Cl₂ = (1.0–1.5)/(0.2–0.3) kPa.

Список литературы

- [1] Головицкий А.П. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 73–76.
- [2] Панченко А.Н., Соснин Э.А. и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 20. С. 77–80.
- [3] Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 2. С. 64–68.
- [4] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Квантовая электрон. 2001. Т. 31. № 4. С. 371–372.
- [5] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 8. С. 121–124.
- [6] Kitagai H., Obara M.A. // Jap. J. Appl. Phys. 1989. Vol. 28. N 12. P. 2228–2231.
- [7] Рогулич В.С., Стародуб В.П., Шевера В.С. // Опт. и спектр. 1990. Т. 69. Вып. 4. С. 756–758.
- [8] Алехин А.А., Баринов В.А., Герасько Ю.В., Костенко О.Ф. и др. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 5. С. 9–20.
- [9] Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 12. С. 43–46.
- [10] Акишев Ю.С., Напартович А.Л., Пашкин С.В. // Физика плазмы. 1978. Т. 4. Вып. 1. С. 152–158.
- [11] Александров В.Л., Кочетов И.В., Мазалов Д.А., Напартович А.П. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. Вып. 11. С. 1468–1475.
- [12] Выхарева А.Л., Иванов О.А., Иванова Л.С., Кузнецов О.Ю. и др. // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 1. С. 40–49.

- [13] Александров В.Л., Напартович А.П. // Усп. физ. наук. 1993. Т. 163. № 3. С. 1–26.
- [14] Голубев В.С., Пашкин С.В. Тлеющий разряд повышенного давления. М.: Наука, 1990. 334 с.
- [15] Shuaibov A.K., Shimon L.L., Dashchenko A.I., Shevera I.V. // J. Phys. Studies. 2001. Vol. 5. N 2.
- [16] Шуайбов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 9. С. 8–12.
- [17] Шуайбов А.К. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 10. С. 117–119.