

02;04;07;12

## Образование возбужденных атомов хлора в поперечном объемном разряде низкого давления

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

Ужгородский национальный университет

E-mail: ishev@univ.uzhorod.ua

Поступило в Редакцию 11 декабря 2001 г.

Представлены результаты исследования характеристик поперечного объемного разряда низкого давления в хлоре при  $P(\text{Cl}_2) = 0.1-1.5$  кПа. Возбуждение хлора проводилось в объеме  $18 \times 2.2 \times (0.5-1.0)$  см при низком зарядном напряжении ( $U_{ch} \leq 10$  кВ) основной накопительной емкости генератора импульсного напряжения. Излучение плазмы анализировалось в спектральном диапазоне 500–900 нм. Получен однородный поперечный разряд короткой длительности ( $\tau \leq 100$  нс), представляющий интерес для использования в ВУФ–УФ лампах и импульсном плазмохимическом реакторе сухого травления. В качестве диагностических спектральных линий для контроля за плотностью возбужденных атомарных радикалов хлора при использовании спектральной аппаратуры со средней разрешающей способностью могут использоваться линии Cl I с  $\lambda = 725; 754; 821$  (2) нм.

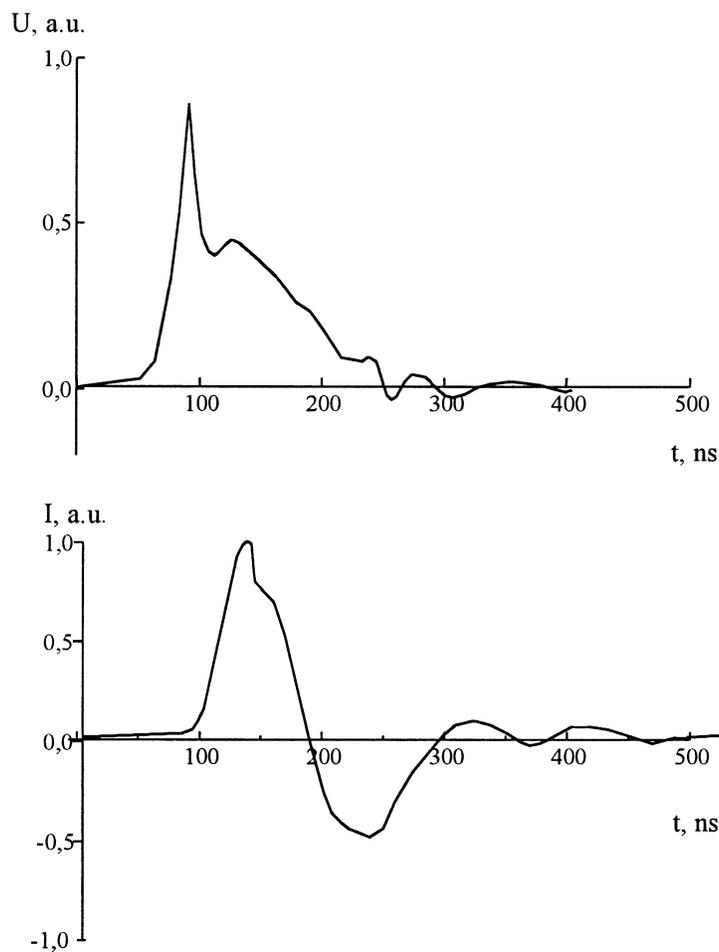
Импульсный объемный разряд в хлоре низкого давления представляет значительный интерес для использования в мощных коротковолновых источниках спонтанного излучения на электронно-колебательных полосах Cl<sub>2</sub> [1,2]. Он может также использоваться в импульсных плазмохимических реакторах для сухого травления тонких покрытий аналогично реактору с накачкой поперечным объемным разрядом (ПОР) на основе фторметана, описанному в [3]. Применение мониторинга процессов *in situ* и детекторов окончания процесса сухого травления слоев нанометровой толщины требует проведения детальной диагностики плазмы и контроля за плотностью радикалов хлора в процессе травления [4]. Для таких целей в реакторах на основе галогеносодержащих газов низкого давления с высокочастотной накачкой широкое применение получили методы оптической спектроскопии излучения, что требует знания оптических характеристик плазмы реактора. Наиболее

интенсивные спектральные линии излучения атомов хлора, по которым возможен контроль плотности радикалов хлора, находятся в ближней инфракрасной области [5]. Излучение плазмы ПОР в хлоре и смеси  $\text{He}/\text{Cl}_2$  исследовалось в спектральной области 140–280 nm [2] и носило чисто молекулярный характер, а в более длинноволновой области спектра оптические характеристики плазмы хлора не изучались.

В данной статье приводятся условия получения однородного поперечного разряда в хлоре и результаты спектроскопического исследования образования возбужденных атомов хлора, распадающихся с излучением в инфракрасной области длин волн.

ПОР получали в объеме  $18 \times 2.2 \times (0.5-1.0)$  см. Межэлектродное расстояние равнялось 2.2 см. Для предыонизации межэлектродного промежутка использовалась двусторонняя автоматическая искровая подсветка. Применялся генератор с перезарядом емкости  $C_0 = 10$  nF на суммарную емкость обострительных конденсаторов  $C_1 = 9.4$  nF. Коммутатором служил водородный тиратрон ТГИ I 1000/25. Зарядное напряжение ( $U_{ch}$ ) варьировалось в пределах 5–10 kV. Устройство разрядного модуля и описание системы регистрации электрических характеристик ПОР представлены в работах [6–8]. Отождествление спектральных линий и полос проводилось с использованием таблиц [9–11]. Излучение анализировалось в спектральной области 500–900 nm. Аппаратные спектры излучения корректировались с учетом относительной спектральной чувствительности монохроматора МДР-2 с дифракционной решеткой 600 strokes/mm и фотоумножителя ФЭУ-106. Калибровка системы регистрации излучения проводилась с использованием банд-лампы. Для исключения наложения вторых порядков интенсивного молекулярного излучения хлора из УФ области спектра использовался светофильтр с пропусканием при  $\lambda \geq 500$  nm.

Однородный поперечный разряд устойчиво зажигался при  $U_{ch} \geq 5$  kV в диапазоне давлений хлора 0.1–1.5 kPa. С увеличением давления хлора ширина ПОР уменьшалась с 1.0 до 0.5 см. Типичные осциллограммы напряжения на электродах и тока ПОР представлены на рис. 1. Ток разряда состоял из положительной и отрицательной полуволны длительностью  $\leq 100$  ns. Ток формировался после пробоя разрядного промежутка в максимуме осциллограммы напряжения и протекал при наличии значительной величины напряжения на электродах. Осциллограммы напряжения и тока ПОР на хлоре были подобны осциллограммам для импульсного объемного разряда в



**Рис. 1.** Осциллограммы напряжения и тока ПОР на хлоре при  $P(\text{Cl}_2)=0.40$  кПа и  $U_{ch} = 7.5$  кВ.

элегазе [12–14]. Значение параметра  $E/N$  на квазистационарной части осциллограммы напряжения ( $\tau = 100\text{--}250$  ns, рис. 1) при плотности хлора  $\approx 6 \cdot 10^{17}$  см $^{-3}$  находится в диапазоне 100–300 Td, в то время

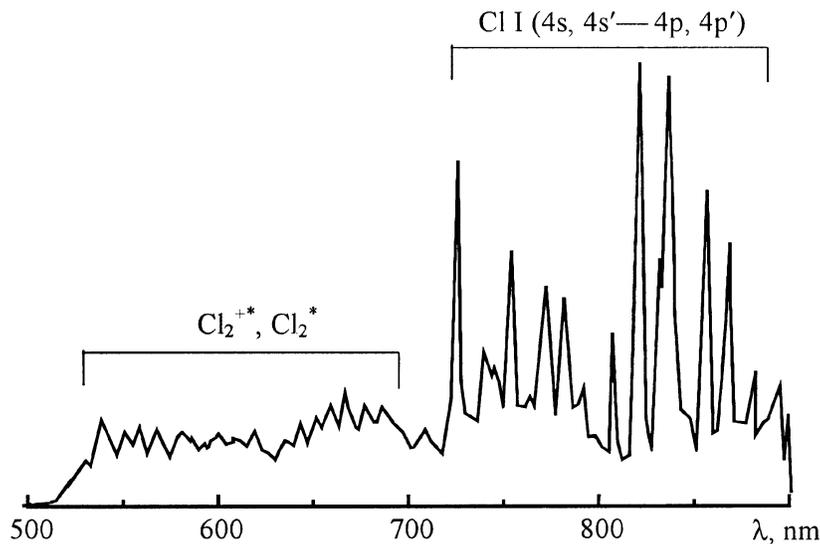


Рис. 2. Спектр излучения плазмы ПОР на хлоре.

как для устойчивого режима существования плазмы тлеющего разряда постоянного тока величины  $E/N$  равна 3 Td [15,16].

На рис. 2 представлены спектры излучения плазмы ПОР на хлоре. В спектре ( $500 \leq \lambda \leq 700$  nm) на фоне слабого непрерывного излучения наблюдалась система молекулярных полос, некоторые из которых можно отнести к излучению ионов  $\text{Cl}_2^+$  ( $\lambda = 539.6; 569.3$  nm [9]) и молекул  $\text{Cl}_2$ . В диапазоне 700–900 nm превалировало излучение спектральных линий атома хлора. Линии излучения принадлежали к системе переходов  $\text{Cl I } (4s, 4s' - 4p, 4p')$ . Относительные интенсивности излучения на данных переходах атома хлора представлены в таблице. Увеличение давления хлора до 1.5 kPa приводило к росту интенсивности излучения спектральных линий  $\text{Cl I}$  в 1.5–5.0 раза, появлению интенсивных линий атома хлора в диапазоне  $\lambda \geq 900$  nm и увеличению вклада излучения молекулярных ионов  $\text{Cl}_2^+$  и возбужденных молекул  $\text{Cl}_2$  в часть спектра при  $\Delta\lambda = 500 - 700$  nm.

Характер спектра в исследуемой области значительно отличался от спектра излучения плазмы хлора тлеющего разряда постоянного

Интенсивность излучения спектральной линии атома хлора в ближней инфракрасной области спектра из плазмы ПОР в хлоре при давлении 0.40 кПа и  $U_{ch} = 7.5$  кВ.

$\lambda$ , nm	Верхний уровень	$E_h$ , eV	$J/k_\lambda$ , а.е.
868.(6)	$4p^4S_{3/2}^0$	10.63	0.90
858.(5)	$4p^4D_{5/2}^0$	10.43	0.85
857.(5)	$4p^4D_{3/2}^0$	10.47	
842.(8)	$4p^4D_{7/2}^0$	10.50	0.45
837.(5)	$4p^4D_{7/2,3/2}^0$	10.40	1.00
833.(3)		10.47	
822.(1)	$4p^2D_{5/2}^0$	10.49	0.80
821.(2)	$4p^4D_{5/2}$	10.43	
808.(7)			
808.(6)	$4p^2D_{3/2,5/2}^0$	11.96	0.25
808.(5)			
808.(4)			
793.(2)	$4d(2)_{9/2}$	11.96	0.10
792.(1)	$4p^2P_{3/2}^0$	10.59	
782.(1)	$4d(2)_{7/2}$	11.86	0.25
774.(4)	$4p^4S_{3/2}^0$	10.63	0.25
771.(7)	$4p^2P_{3/2}^0$	10.59	0.25
754.(7)	$4p^4S_{3/2}^0$	10.63	0.30
741.(4)	$4p^2P_{3/2}^0$	10.59	0.10
725.(6)	$4p^4S_{3/2}^0$	10.63	0.40
708.(6)	$6s(2)_{5/2}$	12.06	< 0.05

тока [17], где из спектральных линий атома хлора были обнаружены только  $\lambda = 725; 741$  и  $755$  nm. Молекулярная структура излучения в диапазоне 540–700 nm для стационарной электроразрядной плазмы хлора также отсутствовала.

Таким образом, установлено, что при умеренной величине зарядного напряжения ( $U_{ch} = 5–10$  кВ) в ПОР на хлоре низкого давления (0.1–1.5 кПа) формируется однородная плазма, представляющая интерес

для использования в импульсном плазмохимическом реакторе сухого травления; контроль за плотностью возбужденных радикалов хлора в плазме может проводиться по излучению спектральных линий 725; 754 и 821 (2) nm Cl I при использовании спектральной аппаратуры с разрешением порядка 1 nm.

## Список литературы

- [1] *Василяк Л.М., Костенко С.В., Красночуб А.В., Кудрявцев Н.Н.* и др. // ТВТ. 1995. Т. 33. № 6. С. 826–832.
- [2] *Шуаибов А.К.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 10. С. 117–119.
- [3] *Королев Ю.Д., Месляц Г.А., Ярош А.М.* // Химия высоких энергий. 1987. Т. 21. № 5. С. 464–468.
- [4] *Орликовский А.А., Руденко К.В.* // Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 2. С. 85–105.
- [5] *Данилов Б.С., Киреев В.Ю.* Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987.
- [6] *Шуаибов А.К.* // Квантовая электроника. 1999. Т. 26. № 2. С. 127–130.
- [7] *Shuaibov O.K., Shimon L.L., Shevera I.V., Minja A.J.* // Journal of Physical Studies. 1999. V. 3. N 2. P. 157–163.
- [8] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Шевера И.В., Дащенко А.И.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 7. С. 640–645.
- [9] *Pears R.W.B., Gaydon A.G.* // The Identification of Molecular Spectra. Chapman Hall LTD. London, 1963.
- [10] *Suchard S.N., Melzer J.E.* Spectroscopic Data. Homonuclear Diatomic Molecules. London, 1976. N 2.
- [11] *Стриганов А.П., Одинцова Г.А.* Таблицы спектральных линий атомов и ионов: Справочник. М., 1982.
- [12] *Спичкин Г.Л.* // ЖТФ. 1986. Т. 56. В. 10. С. 1923–1932.
- [13] *Бычков Ю.И., Горчаков С.А., Ястремский А.Г.* // Изв. высш. учеб. заведений. Физика. 1999. № 8. С. 43–49.
- [14] *Апполонов В.В., Белевцев А.А., Казанцев С.Ю., Сайфулин А.В.* и др. // Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 3. С. 207–228.
- [15] *Горохов А.В., Максимов А.И., Сизов В.Д., Степанова Л.С.* // ЖТФ. 1972. Т. 42. В. 10. С. 2176–2186.
- [16] *Куприяновская А.П., Рыбкин В.В., Светцов В.И.* // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1985. Т. 28. В. 3. С. 61–64.
- [17] *Ефремов А.М., Куприяновская А.П., Светцов В.И.* // ЖПС. 1993. Т. 59. № 3. С. 221–227.