

## Краткие сообщения

04;07;12

Оптические характеристики плазмы поперечного объемного разряда в  $\text{Cl}_2$  и смеси  $\text{He}/\text{Cl}_2$ 

© А.К. Шуайбов

Ужгородский государственный университет,  
294000 Ужгород, Украина

(Поступило в Редакцию 25 ноября 1999 г.)

Приводятся результаты исследования вакуумного ультрафиолетового и ультрафиолетового (ВУФ–УФ) излучения плазмы поперечного разряда наносекундной длительности в хлоре и смеси  $\text{He}/\text{Cl}_2$ . В области длин волн  $\Delta\lambda = 140\text{--}300\text{ nm}$  основными были излучение на  $D'-A'$ -переходе  $\text{Cl}_2$  с кантом при  $258\text{ nm}$  и полоса  $\text{Cl}_2^*$  с кантом  $\lambda = 195\text{ nm}$ . Показано, что в области  $[\text{Cl}_2] = 0.1\text{--}2.0\text{ kPa}$  яркость излучения с  $\lambda \leq 195\text{ nm}$  превышает яркость излучения  $\text{Cl}_2(D'-A')$ . При  $[\text{Cl}_2] \geq 2\text{ kPa}$  основным является излучение с  $\lambda = 258\text{ nm}$ .

Электрический разряд низкого давления в хлоре и его смесях с инертными газами широко применяется для травления тонких пленок в плазмохимии [1]. В последнее время разные виды продольного разряда на смесях  $\text{Kr}(\text{Xe})/\text{Cl}_2$  начали использоваться в мощных эксимерных лампах низкого давления [2,3]. Молекулы хлора являются важной составляющей рабочей среды лазера на  $\lambda = 285\text{ nm}$   $\text{ClF}^*$  [4] с накачкой поперечным объемным разрядом (ПОР). В некоторых случаях молекулы  $\text{Cl}_2$  более предпочтительны и для импульсных эксимерных ламп на основе ПОР. Так, в [5] показано, что эффективность электроразрядных спонтанных излучателей с поперечным разрядом на  $\lambda = 175\text{ nm}$   $\text{ArCl}(B-X)$  значительно выше при использовании в качестве хлорносителя молекул  $\text{Cl}_2$ , чем  $\text{HCl}$ . Молекулы хлора входят также в состав рабочей среды инфракрасных химических лазеров на  $\text{HCl}(\nu)$  с накачкой ПОР [6]. В большинстве случаев исследование плазмы тлеющего разряда в  $\text{Cl}_2$  проводилось при пониженном давлении, что обусловлено контрагированием таких продольных разрядов в сильно электроотрицательной рабочей среде. Характеристики импульсной лампы на  $\text{Cl}_2$  и смеси  $\text{He}/\text{Cl}_2$ , особенно его излучение с  $\lambda \leq 200\text{ nm}$ , изучены мало. Такие исследования важны для разработки импульсных плазмохимических реакторов на хлоре с повышенным давлением рабочей среды, а также мощных спонтанных излучателей в УФ–ВУФ области спектра.

В данной работе приводятся результаты исследования оптических характеристик плазмы импульсного ПОР на  $\text{Cl}_2$  и смеси  $\text{He}/\text{Cl}_2$  в области длин волн  $140\text{--}300\text{ nm}$ .

Возбуждение газов проводилось при помощи ПОР с автоматической искровой предьонизацией в объеме  $18 \times 2.2 \times 1.0\text{ cm}$ , где  $2.2\text{ cm}$  — расстояние между электродами разряда. Схема излучателя с ПОР приведена в [7]. Основная накопительная емкость двухконтурной LC-схемы зажигания ПОР составляла  $30\text{ nF}$ , а обострительная —  $9.4\text{ nF}$ . Коммутатором служил тиратрон ТГИ 1 1000/25. Обострительные керамические

конденсаторы КВИ-3 ( $470\text{ pF}$ ,  $20\text{ kV}$ ) заливались изолирующим компаундом в форме двух блоков и устанавливались внутри разрядной камеры вблизи электродов ПОР. Минимальная индуктивность основной цепи поджига разряда ( $L \leq 10\text{ nH}$ ), наличие изоляторов между плазмой ПОР и заземленными экранами делают данную систему возбуждения подобной к схемам получения высокоскоростных волн ионизации в продольном импульсном разряде [8–10]. Длительность тока ПОР на полувысоте составляла  $\leq 30\text{ ns}$ . Для получения же одинаковой величины параметра  $E/N$  на фронте высокоскоростной ионизационной волны необходимо применение менее

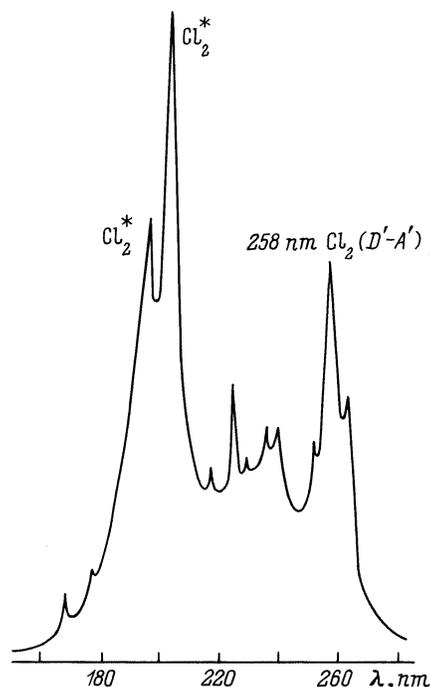
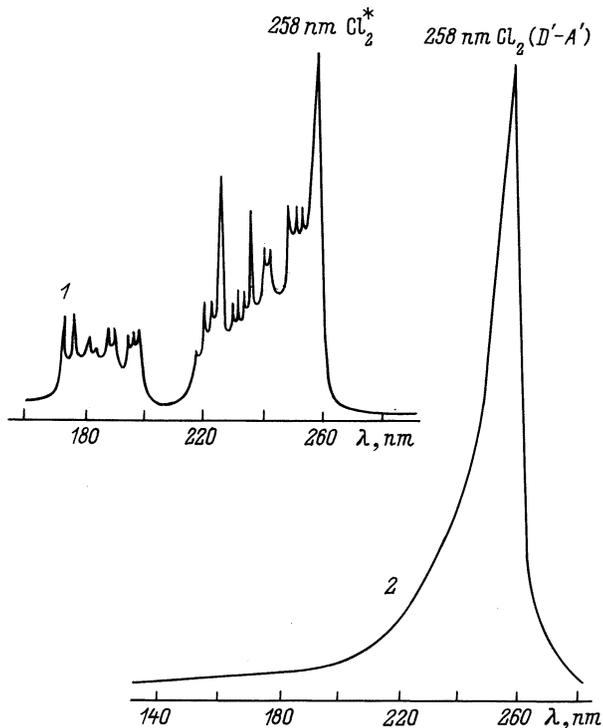
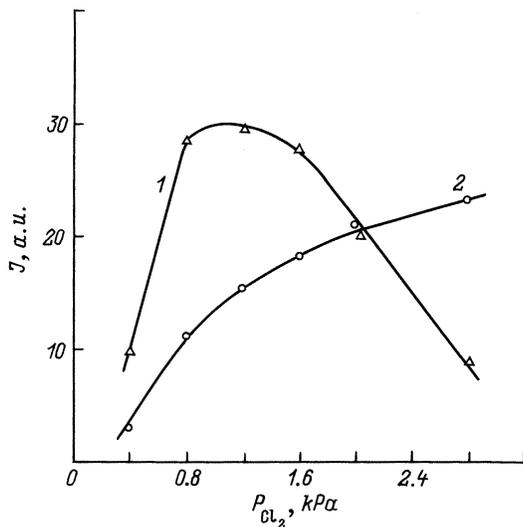


Рис. 1. Спектр излучения плазмы ПОР в хлоре при давлении  $1.2\text{ kPa}$  и  $U_{\text{ch}} = 10\text{ kV}$ .



**Рис. 2.** Спектры излучения плазмы ГОР на смесях He/Cl<sub>2</sub> = 2/0.4 (1) и 50/0.04 кПа (2).



**Рис. 3.** Зависимость яркости полос с кантами  $\lambda = 195$  (1) и 258 нм (2) в сильноточном ГОР на хлоре от давления ( $U_{ch} = 10$  кВ).

высоковольтных источников питания и возможно значительное увеличение объема плазменной среды.

Излучение плазмы ГОР анализировалось с применением полметрового вакуумного монохроматора, изготовленного по схеме Сейя–Намиока, который оборудован дифракционной решеткой на 1200 lin./mm. Камера с ГОР герметически соединялась с вакуумным монохромато-

ром через CaF<sub>2</sub> окно. Приемником излучения служил фотоумножитель ФЭУ-142 с LiF окном. Отсек с ФЭУ-142 и камера с дифракционной решеткой откачивались до остаточного давления  $\leq 10^{-3}$  Па. Относительная калибровка системы "вакуумный монохроматор + ФЭУ-142" проводилась в области 165–350 нм по непрерывному излучению молекул водорода.

На рис. 1 и 2 приведены спектры излучения плазмы ГОР в чистом хлоре и смеси He/Cl<sub>2</sub>. Спектры на рисунках представлены без учета относительной спектральной чувствительности вакуумного спектрофотометра ( $k_\lambda$ ). В таблице представлена расшифровка спектра и приведены относительные интенсивности основных максимумов полос с учетом  $k_\lambda$ . Отождествление полос хлора проводилось по данным работ [11–14]. Основными в исследуемой области спектра были полосы с длинноволновыми квантами при  $\lambda = 258$  нм Cl<sub>2</sub>(D'–A'), 236 и 195 нм. При этом верхнее излучающее состояние для последних двух полос остается неустановленным, а нижними являются довольно высоколежащие состояния A<sup>3</sup>Π(O<sub>0</sub><sup>+</sup>) [13], B(<sup>3</sup>Π<sub>0</sub><sup>+</sup>) [14]. Для полосы с кантом при  $\lambda = 195$  нм верхним состоянием могут быть низколежащие колебательные уровни состояния Cl<sub>2</sub>(<sup>1</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>), образующиеся из состояний Cl<sup>+</sup>(<sup>1</sup>D) и Cl<sup>–</sup>(<sup>1</sup>S), а нижним является состояние A'<sup>3</sup>Π(2u) [15]. В ГОР на смеси He/Cl<sub>2</sub>, особенно при значительном содержании гелия, происходит синглет-триплетная релаксация Cl<sub>2</sub><sup>\*\*</sup> в состояние D<sup>3</sup>Π<sub>2g</sub>, и в излучении плазмы остается только полоса с  $\lambda = 258$  нм Cl<sub>2</sub>(D'–A') (рис. 2).

Распределение интенсивности в спектре излучения ГОР на хлоре при [Cl<sub>2</sub>] = 2.8 кПа и  $U = 10$  кВ

$\lambda$ , nm	$I/k_\lambda$ , a.u.	Отождествление
168	0.73	Cl <sub>2</sub> [H–X <sup>1</sup> Σ <sub>g</sub> <sup>+</sup> ]
177	0.70	Cl <sub>2</sub> [ <sup>1</sup> Σ– <sup>1</sup> Π <sub>4</sub> ] [14]
184	0.79	Полоса Cl <sub>2</sub> <sup>*</sup> с $\lambda = 180–195$ нм
189	0.87	То же
193	1.06	" "
195	1.87	" "
200	0.95	Максимум на континууме хлора с $\lambda = 200$ нм [11,12]
212	0.63	
223	0.88	Cl <sub>2</sub> (I–B <sup>3</sup> Π <sub>0</sub> <sup>+</sup> ) полоса Cl <sub>2</sub> с $\lambda = 223–236$ нм [14]
228	0.70	То же
231	0.78	" "
235	0.77	" "
239	0.97	Cl <sub>2</sub> (D'–A') [15]
		Полоса с $\lambda = 239–260$ нм
247	1.53	То же
252	1.44	" "
258	2.65	" "
276	0.82	Максимум на континууме хлора с $\lambda = 276.1$ нм [11,12]
291	0.70	
295	1.03	Максимум на континууме хлора с $\lambda = 295.7$ нм [11,12]

На рис. 3 представлена зависимость суммарной яркости полос с  $\lambda = 195$  и  $258 \text{ nm}$  от давления  $\text{Cl}_2$  на сильноточной стадии ПОР в чистом хлоре. Как видно из рис. 3, при  $[\text{Cl}_2] = 0.4\text{--}0.2 \text{ kPa}$  превалирует по величине яркости полоса с  $\lambda = 195 \text{ nm}$ . При дальнейшем увеличении давления хлора основным становится излучение с  $\lambda = 258 \text{ nm}$   $\text{Cl}_2(D'-A')$ . Сравнение скорости спада яркости полосы с  $\lambda = 195 \text{ nm}$  от давления  $\text{Cl}_2$  и  $\text{He}$  в смеси  $\text{He}/\text{Cl}_2$  показало, что скорость синглет-триплетного перехода  $\text{Cl}_2^{**}-\text{Cl}_2(D')$  (или скорость тушения этой полосы) более чем на порядок выше под действием молекул  $\text{Cl}_2$ , чем атомов  $\text{He}$ .

Таким образом, показано, что в диапазоне давлений хлора ( $0.4\text{--}3.0 \text{ kPa}$ ) и смеси  $\text{He}/\text{Cl}_2$  ( $P \leq 30 \text{ kPa}$ ) существует устойчивая стадия сильноточного ПОР, которая представляет интерес для плазмохимических применений. При низком содержании  $\text{Cl}_2$  ( $P_{\text{opt}} = 0.8\text{--}1.6 \text{ kPa}$ ) данный разряд является интенсивным источником излучения на полосе с кантом  $\lambda = 195 \text{ nm}$ . Разбавление хлора гелием ( $[\text{He}] \geq 10\text{--}30 \text{ kPa}$ ) приводит к концентрации всего УФ-ВУФ излучения плазмы ПОР на переходе с  $\lambda = 258 \text{ nm}$   $\text{Cl}_2(D'-A')$ .

## Список литературы

- [1] Куприяновская А.П., Светцов В.И., Лукашина И.А. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1987. Т. 30. Вып. 11. С. 52–57.
- [2] Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 1. С. 78–82.
- [3] Головицкий А.П. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 6. С. 63–67.
- [4] Diegelmann M., Honla K., Komra K.L. // Opt. Commun. 1979. Vol. 29. N 3. P. 334–338.
- [5] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 11. С. 29–33.
- [6] Гордон Е.Б., Матюшенко В.И., Репин Р.Б., Сизов В.Д. // Квантовая электрон. 1990. Т. 17. № 5. С. 554–555.
- [7] Шуаибов А.К. // Квантовая электрон. 1999. Т. 26. № 2. С. 127–130.
- [8] Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Марковец В.В. // ТВТ. 1983. Т. 21. № 2. С. 371–381.
- [9] Абрамов А.Г., Асиновский Э.И., Василяк Л.М. // Физика плазмы. 1988. Т. 14. № 8. С. 979–986.
- [10] Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 4. С. 376–383.
- [11] Pears R.W.B., Gaydon A.G. The Identification of Molecular Spectra. London: Chapman Hall LTD, 1963. P. 142–143.
- [12] Spectroscopic Data. Vol. 2. Homonuclear Diatomic Molecules / Ed. S.N. Suchard, J.E. Melzer. New York; Washington; London:IFI/Plenum, 1976. P. 139–141.
- [13] Хьюбнер К.П., Герцберг Г. Константы двухатомных молекул. Ч. 1. М.: Мир, 1984. 408 с.
- [14] Смирнов Б.М., Яценко А.С. Химия плазмы / Под ред. Б.М. Смирнова. М.: Энергоатомиздат, 1989. 296 с.
- [15] Зув В.С., Канаев А.В., Михеев Л.Д. Квантовая электрон. 1984. Т. 11. № 2. С. 354–365.