

04:07

## Поднормальный тлеющий разряд на смеси Xe/Cl<sub>2</sub> в узкой разрядной трубке

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

Ужгородский государственный университет,  
88000 Ужгород, Украина

(Поступило в Редакцию 13 октября 2000 г.)

Приводятся результаты исследования электрических и оптических характеристик поднормального тлеющего разряда в короткой ( $L = 10$  см) разрядной трубке с внутренним диаметром 5 мм. Изучались вольт-амперные характеристики и энерговыход в разряд, спектральные характеристики плазмы в области 130–350 нм, яркости излучения полос с  $\lambda = 236$  нм XeCl( $D-X$ ), 308 нм XeCl( $B-X$ ) и суммарной яркости излучения в области 180–340 нм в зависимости от величины давления и парциального состава смеси Xe/Cl<sub>2</sub>. Показано, что наблюдаются две стадии тлеющего разряда: слаботочная (при разрядных токах  $I_{ch} \leq 2$  мА) и сильноточная при  $I_{ch} > 2$  мА, переход между которыми осуществляется в виде скачка. С увеличением содержания хлора в смеси возрастает падение напряжения на электродах трубки и наблюдается рост энерговыхода в плазму. При пониженном давлении смеси Xe/Cl<sub>2</sub> ( $P \leq 0.7$  кПа) в катодной области разряда наблюдалось формирование стоящих страт. Объем разряда, занятый стратами, возрастал с уменьшением разрядного тока. Исследуемый продольный разряд является мощным источником стационарного широкополосного излучения в области 180–340 нм, формирующегося в результате перекрытия полос излучения XeCl( $D, B-X$ ) и Cl<sub>2</sub><sup>\*</sup> с кантами при  $\lambda = 236, 308$  и 258 нм. Яркость излучения полосы  $\lambda = 236$  нм не превышала 20% от суммарной яркости ультрафиолетового (УФ) излучения. Для получения максимальной мощности УФ излучения оптимальное содержание хлора в смеси находится в диапазоне 250–320 Па, а давление смеси равно 2 кПа. Максимальная мощность УФ излучения достигала 3 Вт при коэффициенте полезного действия 8%.

### Введение

Продольный тлеющий разряд низкого давления на смесях тяжелых инертных газов (Ar, Kr, Xe) с молекулами хлора начал систематически изучаться более двадцати лет назад [1,2], что было обусловлено широким применением плазмы инертных газов с малыми добавками галогенсодержащих молекул в плазмохимии [3,4], квантовой электронике и других областях науки и техники. Первые исследования таких разрядов проводились в смесях Ar/Cl<sub>2</sub> [1] и Kr/Cl<sub>2</sub> [2] при давлении  $P \leq 130$  Па в разрядных трубках диаметром 14–30 мм, длиной  $L = 50$  см и были в основном направлены на изучение функций распределения электронов по энергиям и электрических характеристик положительного столба.

Впервые продольный тлеющий разряд низкого давления на смесях Xe/Cl<sub>2</sub> и Kr/Cl<sub>2</sub> как эффективный стационарный излучатель в УФ области длин волн был предложен и оптимизирован в работах [5–7]. Разряд зажигался в кварцевых разрядных трубках длиной  $L = 17–28$  см с внутренними диаметрами 1.2–3.0 см. Для разрядных токов  $I_{ch} = 20–30$  мА в давлении  $P = 0.6–4$  кПа мощность излучения эксимерной лампы достигала 10–20 Вт при КПД равном 12–23%. Исследование распределений концентрации молекул XeCl<sup>\*</sup> и KrCl<sup>\*</sup> по длине и диаметру разрядной трубки показало, что они являются неоднородными: наибольшее количество эксимерных молекул образуется в области анода и центральной части разрядной трубки [6]. Максимальный КПД УФ излучения достигался в данных экспериментах при сравнительно малых разрядных токах ( $I_{ch} \leq 10$  мА), когда на элект-

тродах разрядной трубки наблюдался наибольший спад напряжения. Согласно классификации стадий продольного разряда постоянного тока, такая его высоковольтная стадия наблюдается при переходе от темного таунсендовского к нормальному тлеющему разряду и называется поднормальным тлеющим разрядом (ПТР) [8]. ПТР в коаксиальной разрядной трубке длиной 40 см успешно использовался для создания эксимерной лампы с КПД до 30% и мощностью излучения 8 Вт.

В настоящей работе продолжается публикация результатов наших исследований эксимерных излучателей пониженного давления ( $P \leq 30$  кПа) с накачкой электрическим разрядом, которые работают на смесях Ar, Kr и Xe с молекулами Cl<sub>2</sub> [9–14]. Основная особенность проведенных исследований связана с переходом в стационарный режим накачки и дальнейшем уменьшении давления рабочих смесей. В данной работе приводятся результаты исследования электрических, спектральных и энергетических характеристик ПТР низкого давления на смесях Xe/Cl<sub>2</sub>, получаемого в короткой разрядной трубке малого диаметра.

### Методика, техника и условия эксперимента

Тлеющий разряд зажигался в тонкостенной кварцевой трубке с внутренним диаметром 5 мм и межэлектродным расстоянием 100 мм. Катод и анод разрядной трубки изготовлены из никеля, имели цилиндрическую

форму и одинаковые размеры. Внешний диаметр электродов составлял 5 мм, а их длина — 10 мм. Электроды устанавливались внутри кварцевой трубки в ее открытых концевых частях. Трубка размещалась в вакуумной камере с окном из  $\text{CaF}_2$  и тремя кварцевыми окнами диаметром 5 см. Объем камеры составлял 10 л и служил в качестве буферного для исследуемого тлеющего разряда. Камера через окно из  $\text{CaF}_2$  была пристыкована к полимерному вакуумному монохроматору, изготовленному по схеме Сейя–Намиока и снабженному дифракционной решеткой на 1200 lines/mm. Центр разрядной трубки устанавливался, так что он находился на одном уровне с центрами входной и выходной щелей монохроматора. Приемником излучения служил фотоумножитель с LiF-окном (ФЭУ-142). Монохроматор и отсек с фотоумножителем откачивались до остаточного давления  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  Па. Рабочий диапазон данного спектрофотометра составлял 130–350 нм. Относительная калибровка системы монохроматор + ФЭУ-142 проводилась в диапазоне  $\Delta\lambda = 165$ –350 нм по континууму молекул водорода. Система регистрации сигнала с фотоприемника была аналогичной, описанной нами в работах [10–14]. ПТР зажигался при помощи высоковольтного выпрямителя ( $U \leq 30$  кВ;  $I_{ch} \leq 100$  мА), напряжение с выхода которого подавалось на анод разрядной трубки через балластное сопротивление ( $r_b = 400$ –700 к $\Omega$ ). Диапазон рабочих токов в эксперименте составлял  $I_{ch} = 0.5$ –30.0 мА. Измерение абсолютной мощности излучения ПТР проводилось по методике работы [9] с использованием измерителя "Кварц-01". При этом между головкой измерителя "Кварц-01" и диафрагмой на поверхности разрядной трубки устанавливался светофильтр с полосой пропускания  $\Delta\lambda = 200$ –400 нм и учитывалась относительная спектральная чувствительность измерительной головки.

## Электрические и оптические характеристики

ПТР существовал в форме слаботочной и сильноточной стадий, переход между которыми происходит скачком при  $I_{ch} = 0.5$ –1.5 мА, что проявлялось на некоторых вольт-амперных характеристиках (рис. 1) в виде максимума  $U_{ch}$  при малых разрядных токах. В дальнейшем скорость спада  $U_{ch}$  замедлялась, что соответствовало выходу напряжения на плато и переходу в режим нормального тлеющего разряда. При  $I_{ch} \geq 10$  мА наши ВАХ коррелировались с результатами работы [15] для трубки диаметром 9 мм,  $L = 23$  см и  $I_{ch} = 10$ –80 мА. Форма ВАХ исследуемого ПТР в области малых токов была также подобной к ВАХ поднормального разряда в коаксиальной трубке [9]. С увеличением давления и содержания хлора в смеси наблюдался рост величины  $U_{ch}$  и энерговыклада в разряд (рис. 2). Уменьшение давления смеси  $\text{Xe}/\text{Cl}_2$  до 0.5–0.7 кПа приводило к формированию стоячих страт в катодной части разрядной трубки. С уменьшением величины тока от 10 до 3 мА страты равномерно заполняли всю длину положительного столба.

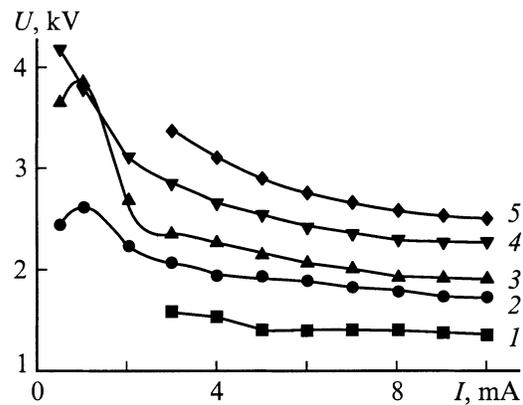


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики ПТР на смесях  $\text{Xe}/\text{Cl}_2$ :  $P_{\text{Xe}}/P_{\text{Cl}_2} = 0.60/0.08$  (1),  $2.00/0.04$  (2),  $2.00/0.16$  (3),  $2.00/0.40$  (4),  $2.00/0.56$  кПа (5).

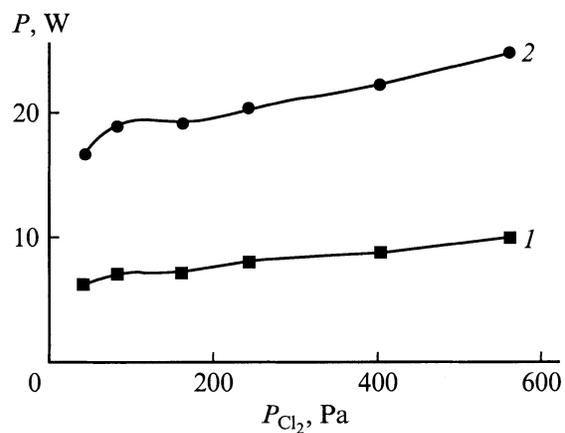


Рис. 2. Зависимость мощности, вкладываемой в ПТР на смесях  $\text{Xe}/\text{Cl}_2$  от содержания молекул хлора при  $P_{\text{Xe}} = 2.0$  кПа и  $I_{ch} = 3$  (1), 10 мА (2).

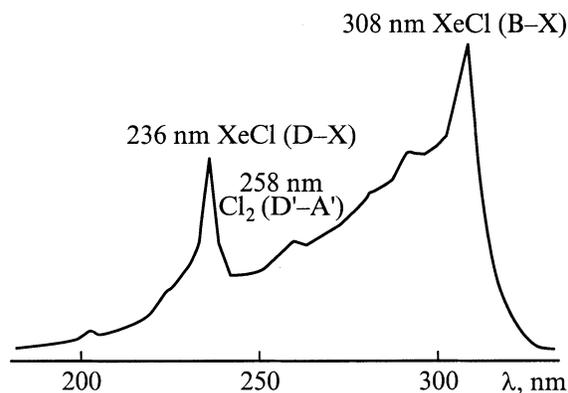
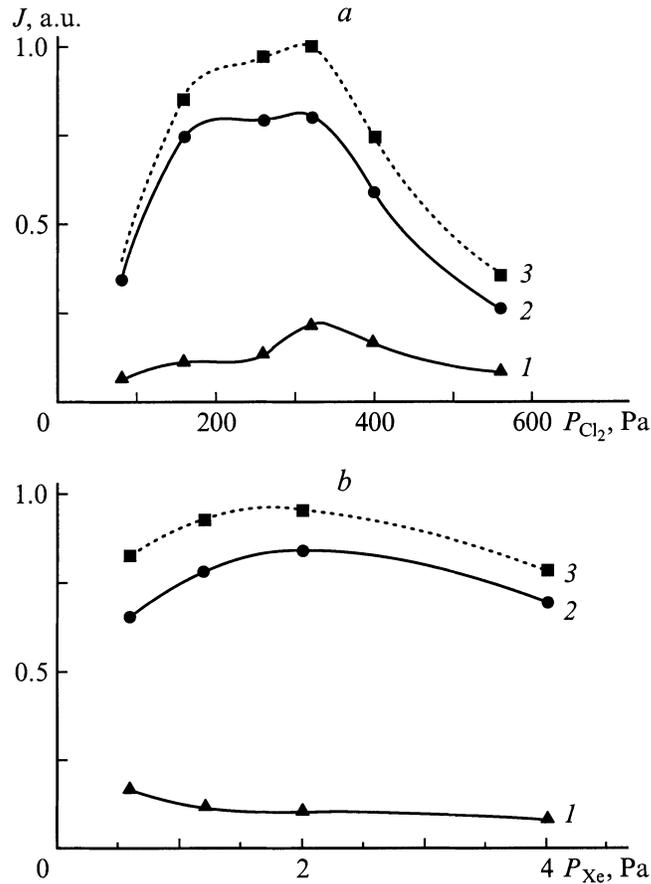


Рис. 3. Спектр излучения плазмы ПТР на смеси  $\text{Xe}/\text{Cl}_2$ .

Режим стратифицированного ПТР представляет интерес для разработки специальных источников УФ излучения с регулярным и управляемым распределением яркости



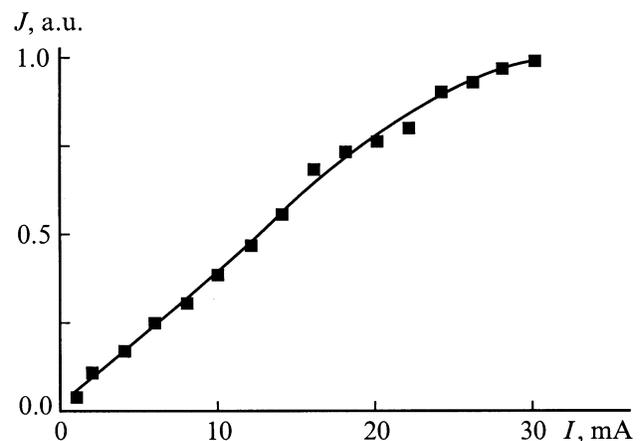
**Рис. 4.** Зависимость яркости излучения полос  $\text{XeCl}(D, B-X)$  и суммарной яркости плазмы ПТР в области  $\Delta\lambda = 180-340$  nm от парциального давления ксенона при  $P_{Cl_2} = 80$  Pa (a) и парциального давления хлора при  $P_{Xe} = 2.0$  kPa (b): 236 nm (1), 308 nm (2) и  $\Delta\lambda = 180-340$  nm (3);  $I_{ch} = 8$  mA.

по рабочей поверхности излучателя. Такие излучатели представляют интерес для нанесения регулярных геометрических фигур на поверхность фоточувствительных материалов и изготовления специальных фотошаблонов.

В спектрах излучения ПТР на смеси Xe/Cl<sub>2</sub> (рис. 3) обнаружены сильно уширенные полосы с кантами при  $\lambda = 236$  nm  $\text{XeCl}(D-X)$ , 308 nm  $\text{XeCl}(D-X)$  и полоса  $\lambda = 258$  nm Cl<sub>2</sub> ( $D'-A'$ ). Из-за уширения и сильного перекрытия данных полос исследуемый излучатель можно рассматривать в качестве широкополосного с шириной полосы  $\Delta\lambda = 340-180$  nm. Весь спектр излучения был разделен на две полосы:  $\text{XeCl}(B-X)$  (совместно с полосой  $\lambda = 258$  nm Cl<sub>2</sub>) и  $\text{XeCl}(D-X)$ , так что при их сшивке получался исходный спектр, зарегистрированный в настоящем эксперименте. Для каждой смеси по спектру излучения ПТР в области  $\Delta\lambda = 180-340$  nm определялись яркости полос  $\text{XeCl}(D, B-X)$  и суммарная их яркость в данном диапазоне длин волн. За яркость полосы принималась площадь под соответствующей кривой на спектре излучения, который исправлялся с учетом относительной спектральной чувствительности монохроматора и фотоумножителя.

На рис. 4 представлены результаты оптимизации эксимерного излучателя с накачкой смеси Xe/Cl<sub>2</sub> ПТР

от содержания молекул хлора и атомов ксенона. Вклад перехода  $\text{XeCl}(D-X)$  в УФ излучение плазмы ПТР не превышал 10–20%. Оптимальное содержание молекул Cl<sub>2</sub>\* находилось в диапазоне 250–320 Pa. В области раз-



**Рис. 5.** Зависимость яркости излучения полосы с  $\lambda = 236$  nm  $\text{XeCl}(D-X)$  от величины тока ПТР на смеси Xe/Cl<sub>2</sub> = 3.6/0.24 kPa.

рядных токов 1–20 мА зависимость яркости излучения полосы с  $\lambda = 236$  нм от величины среднего тока  $I$  имеет линейную форму, а при более высоких токах наблюдается насыщение скорости роста яркости излучения (рис. 5). Такой вид зависимости  $J = f(I_1)$  близок к зависимости интегральной мощности УФ излучения для продольного тлеющего разряда в широкой трубке [5], где при  $I \geq 30$  мА наблюдался спад мощности УФ излучения с ростом тока. Максимальная средняя мощность излучения в области 180–340 нм составляла 3 Вт при КПД 8%.

## Выводы

Исследование характеристик поднормального тлеющего разряда низкого давления на смеси Хе/Сl<sub>2</sub> в короткой разрядной трубке с малым внутренним диаметром показало, что он может служить достаточно эффективным источником стационарного излучения в области 180–340 нм ( $P = 3$  Вт; КПД 8%); за счет сильного перекрытия молекулярных полос ХеСl( $D, B-X$ ) и Сl<sub>2</sub>( $D-A$ ) излучение имеет форму континуума с максимумами при  $\lambda = 236, 258, 308$  нм; яркость излучения полосы 236 нм ХеСl( $D-X$ ) не превышает 20% от суммарной яркости УФ излучения лампы; оптимальное содержание молекул хлора находится в диапазоне 250–320 Па, а давление ксенона равно 2 кПа.

## Список литературы

- [1] Зайцев В.В., Зверевская Е.Ю., Зухер Я.И., Нетягов П.Д. // ТВТ. 1978. Т. 16. № 6. С. 1152–1157.
- [2] Зайцев В.В., Нетягов П.Д., Божко Н.В. // ТВТ. 1980. Т. 18. № 5. С. 944–948.
- [3] Данилин Б.С., Киреев В.Ю. Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 269 с.
- [4] Ефремов А.М., Куприяновская А.И., Светцов В.И. // Химия высоких энергий. 1993. Т. 27. № 1. С. 88–91.
- [5] Головицкий А.П. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 73–76.
- [6] Головицкий А.П., Кан С.Н. // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 3. С. 604–609.
- [7] Головицкий А.П., Лебедев С.В. // Опт. и спектр. 1997. Т. 82. № 2. С. 251–255.
- [8] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 592 с.
- [9] Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Опт. и спектр. 1998. Т. 84. № 3. С. 389–392.
- [10] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. Вып. 11. С. 29–33.
- [11] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В. Проблемы экономического и социального развития региона и практика научного эксперимента. Киев; Ужгород; Ниредьгаза: Карпаты, 2000. Вып. 16. С. 185–186.
- [12] Шуаибов А.К. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 9. С. 1–6.
- [13] Шуаибов А.К., Дащенко А.И. // Квантовая электрон. 2000. Т. 30. № 3. С. 279–281.

- [14] Шуаибов А.К., Дащенко А.И. // ПТЭ. 2000. № 3. С. 101–103.
- [15] Ломаев М.И., Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 2. С. 64–68.