

02;04;07;12

Планарный эксимерно-галогенный излучатель с накачкой поперечным высокочастотным разрядом

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

Ужгородский национальный университет

E-mail: ishev@univ.uzhgorod.ua

Поступило в Редакцию 8 января 2003 г.

Представлены результаты исследования характеристик планарного источника широкополосного коротковолнового излучения с накачкой поперечным высокочастотным ($f = 1.76$ MHz) разрядом, который зажигался в смеси Kr/Xe/Cl₂ ($P \leq 500$ Pa). Исследованы спектральные характеристики излучения плазмы в области 130–600 nm, осциллограммы напряжения, тока и излучения разряда, зависимость мощности излучения от давления и парциального состава рабочей смеси, а также электрической мощности разряда.

Установлено, что источник излучает преимущественно в спектральном диапазоне 170–330 nm на системе полос молекул XeCl (D, B–X), KrCl (B–X), Cl₂ (D'–A') и Cl₂*. Для получения максимальной мощности УФ–ВУФ излучения наиболее оптимальными были газовые смеси $P(\text{Kr})/P(\text{Xe})/P(\text{Cl}_2) = 150-200/150-200/20-40$ Pa. Максимальная мощность излучения в угол 4π с двух рабочих апертур суммарной площадью $S \leq 100$ cm² достигала 30–40 W. В околопороговой области по напряжению зажигания поперечного разряда обнаружены узкие пики излучения плазмы, образование которых может быть связано со скачками плотности электронов, положительных и отрицательных ионов на границе „плазма–слой“ высокочастотного разряда.

В настоящее время образование активной среды в значительном большинстве электроразрядных эксимерно-галогенных лампах осуществляется при помощи продольного тлеющего разряда и импульсно-периодического разряда через диэлектрик [1–3]. Эти разряды получают преимущественно в цилиндрических кварцевых трубках, и рабочая апертура соответствующей лампы также является цилиндрической. Для некоторых применений в микроэлектронике и плазмохимических технологиях необходимо равномерное освещение мощным источни-

ком ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового (УФ–ВУФ) излучения плоских поверхностей, что может быть достигнуто при помощи планарных эксимерно-галогенных ламп. В работе [4] приведены некоторые характеристики планарной лампы на системе полос молекулы XeCl^* , активной средой которой служит плазма короткого тлеющего разряда на смесях $\text{Xe/Cl}_2(\text{HCl})$ ($P < 2.0 \text{ kPa}$). Излучение в такой лампе выводится через перфорированный электрод, поэтому ее выходные характеристики были сильно ограничены величиной тока накачки ($I_{ch} \leq 10 \text{ mA}$), при котором происходит разрушение сеточного электрода.

Для создания мощных и эффективных источников спонтанного излучения на основе галогенидов тяжелых инертных газов и димеров галогенов с планарной апертурой перспективно применение поперечного высокочастотного разряда. Слаботочный высокочастотный разряд индуктивного типа успешно использовался для накачки XeCl -лампы (работающей на смеси Xe/Cl_2 при общем давлении $P \leq 500 \text{ Pa}$) с цилиндрической рабочей апертурой [5]. Для увеличения мощности УФ–ВУФ излучения и использования высокой излучательной способности плазмы приэлектродных слоев ВЧ-разряда представляет интерес применение сильноточного поперечного высокочастотного разряда (ПВЧР) в эксимерно-галогенной лампе. При малом значении параметра $p \cdot d$ (где p — давление, d — межэлектродное расстояние) плазма ПВЧР будет состоять преимущественно из приэлектродных слоев, которые по своей природе аналогичны прикатодным частям продольного тлеющего разряда постоянного тока [6], и характеризуется повышенной яркостью излучения плазмы по сравнению с положительным столбом. В работах [7,8] нами была получена сравнительно высокая мощность и эффективность излучения эксимерно-галогенной лампы на системах полос $195\text{--}200/257 \text{ nm Cl}_2^{**}$ (смесь He/Cl_2) и $195\text{--}200/222/257 \text{ nm}$ (смесь Kr/Cl_2), активная среда которой сформирована в протяженной плазме отрицательного катодного свечения вольерного разряда постоянного тока.

В настоящей статье представлены результаты исследования характеристик планарного высокочастотного излучателя на смеси криптона с хлором.

ПВЧР зажигался в объеме $17 \times 3 \times 2 \text{ cm}$ при межэлектродном расстоянии $d = 2.2 \text{ cm}$. Система электродов состояла из никелированного латунного электрода длиной 17 cm с радиусом закругления

3 см и плоского никелевого электрода. Электроды ПВЧР крепились на диэлектрическом фланце внутри разрядной камеры объемом 10 л. Спектры излучения плазмы регистрировались из торцевой части плазменного объема при помощи вакуумного монохроматора и фотоумножителя ФЭУ-106 ($\Delta\lambda = 130\text{--}355\text{ nm}$) или монохроматора МДР-2 с ФЭУ-106 ($\Delta\lambda = 210\text{--}660\text{ nm}$). Возле другого торца плазменной среды устанавливался импульсный фотоумножитель „Фотон“, соединенный с импульсным осциллографом CI-99, что позволяло регистрировать импульсы суммарного излучения плазмы. Источник высокочастотного напряжения со средней мощностью $\leq 300\text{ W}$ генерировал макроимпульсы напряжения с максимальной длительностью 12 ms и амплитудой до 5–6 kV, которые были заполнены высокочастотной составляющей ($f = 1.76\text{ MHz}$). Подача высокочастотного напряжения на систему электродов проводилась через блокировочную емкость ($C_0 \leq 200\text{ pF}$). Полная мощность УФ–ВУФ излучения измерялась с одной из боковых апертур ПВЧР по методике, приведенной в статье [9]. Измерение величины напряжения на разрядном промежутке проводилось с использованием малоиндуктивного емкостного делителя, а импульсов тока — с применением малоиндуктивного шунта ($R = 1\text{--}5\ \Omega$). В эксперименте использовался криптон спектральной чистоты и хлор технической чистоты. Разрядная камера предварительно откачивалась до остаточного давления 3–5 Pa и пассивировалась в хлоре. Принудительное охлаждение системы электродов и рабочей среды лампы не использовалось.

При давлении смеси Kr/Cl₂ в диапазоне 100–500 Pa зажигался пространственно-однородный ПВЧР, состоящий на 50–70% из плазмы ярких приэлектродных слоев, которым присущи все характерные области катодных частей тлеющего разряда постоянного тока [6]. Основной вклад в излучение плазмы ПВЧР принадлежал протяженному отрицательному катодному свечению. Исследование спектральных характеристик плазмы ПВЧР показало, что основное излучение разряда сконцентрировано в спектральном диапазоне 180–280 nm и имеет форму широкой полосы, как и для самоиницирующегося импульсно-периодического разряда на смеси Kr/Cl₂ [10]. Из-за низкого давления рабочей смеси полосы излучения 222 nm KrCl, 257 nm Cl₂ (D'–A') и 200 nm Cl₂* были сильно уширены и перекрывались между собой. Основной причиной уширения спектральных полос является незавершенность процессов колебательной релаксации в пределах возбужденных состояний молекул KrCl и Cl₂ [11]. В видимой области спектра

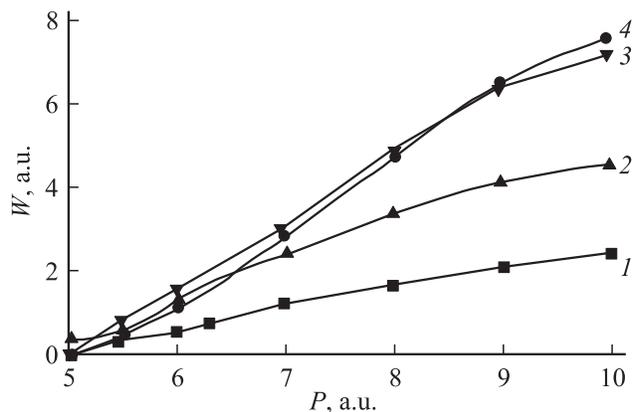


Рис. 1. Зависимость мощности излучения ПВЧР в смесях Kr и Xe с молекулами Cl_2 от величины электрической мощности разряда: $P(\text{Xe})/P(\text{Cl}_2) = 80/40$ (1), $P(\text{Kr})/P(\text{Xe})/P(\text{Cl}_2) = 80/80/40$ (2), $200/80/40$ (3), $320/80/40$ (4) Pa.

($\lambda\lambda = 400\text{--}600\text{ nm}$) излучение плазмы было представлено в основном спектральными линиями KrI ($5s\text{--}6p$).

Результаты оптимизации средней мощности излучения ПВЧР в зависимости от величины мощности накачки при разном давлении и составе смеси криптона с хлором приведены на рис. 1. Все зависимости величины мощности излучения от мощности ПВЧР были возрастающими. С увеличением парциального давления криптона от 80 до 400 Pa наблюдалось увеличение и мощности излучения разряда. При $P(\text{Kr}) \geq 400\text{ Pa}$ и $P(\text{Cl}_2) \geq 80\text{ Pa}$ разряд не зажигался. Увеличение $P(\text{Cl}_2)$ выше 40 Pa приводило к уменьшению мощности излучения разряда. Оптимальное значение $P(\text{Cl}_2)$ находилось в диапазоне 20–40 Pa, но его точное определение было затруднено возможностями вакуумной газосмесительной системы. Для ПВЧР на смеси Kr/Cl_2 с малым содержанием хлора наблюдалось повышение эффективности излучения при небольшой мощности накачки ($W \leq 8\text{ a.u.}$, 4 на рис. 1).

На рис. 2 приведены осциллограммы излучения плазмы ПВЧР и динамика изменения усредненных за период ВЧ-колебания напряжения и суммарного излучения плазмы. Излучение плазмы характеризовалось постоянной и переменной во времени составляющими. Частота следова-

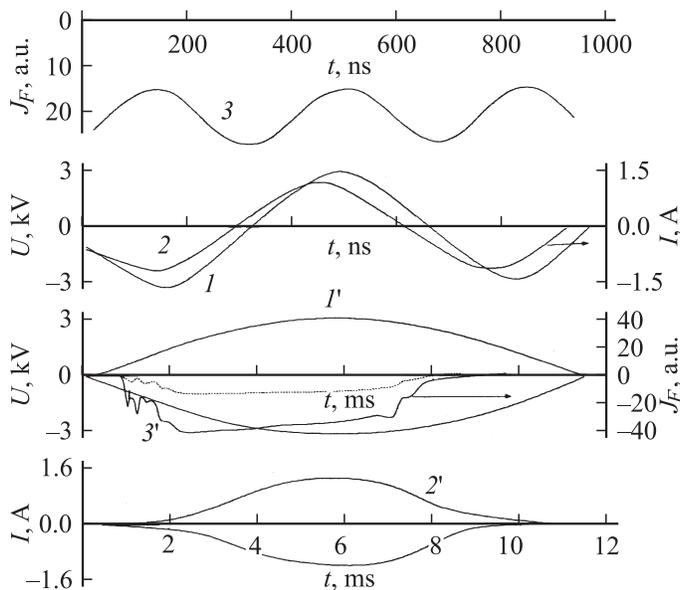


Рис. 2. Осциллограммы напряжения (I, I'), тока ($2, 2'$) и излучения плазмы ПВЧР ($3, 3'$) в смеси $P(\text{Kr})/P(\text{Xe})/P(\text{Cl}_2) = 120/120/120$ Па (где $I' - 3'$ — усредненные за ВЧ-период величины).

ния переменной составляющей была равна удвоенной частоте ВЧ-колебаний. Длительность переменной составляющей у основания достигала 300 ns. С увеличением $P(\text{Xe})$ увеличивался и вклад постоянной составляющей излучения в суммарное излучение ПВЧР (рис. 2, а). Поскольку в плазме низкой плотности на смесях тяжелых инертных газов с хлором основным каналом образования эксимерных молекул является „гарпунная“ реакция [12], то наличие постоянной составляющей может быть связано со стационарным каналом образования метастабильных атомов криптона в плазме ПВЧР. Рассмотрение поведения усредненной мощности излучения выявило, что в околороговой по величине напряжению питания области формируется пиковая структура. Для разряда на смеси $\text{Kr}/\text{Xe}/\text{Cl}_2$ низкого давления характерен один узкий пик, а с увеличением давления смеси количество пиков увеличивалось до трех.

При этом средняя величина пробойного напряжения увеличивалась с 1.5 до 2.5 kV.

В многокомпонентной плазме электроотрицательных газов, получаемой при ВЧ накачке, в работах [13–15] теоретически было предсказано образование скачков плотности электронов, положительных и отрицательных ионов на границе раздела плазменных сред с разными параметрами. Для ПРВЧ это граница „плазма–слой“. Поэтому образование пиковой структуры излучения в припороговой области зажигания исследуемого разряда может быть связано с прохождением реакций образования эксимерных молекул и Cl_2 в области скачков плотности частиц. Детальное отождествление природы пиков требует проведения численного моделирования ПРВЧ на смеси Kr/Xe/Cl_2 при условиях, близких к условиям нашего эксперимента.

Оценка полной мощности излучения ПРВЧ в угол 4π показала, что она достигает 30–40 W.

Таким образом, установлено, что сильноточный поперечный высокочастотный разряд на смеси Xe/Kr/Cl_2 является планарным источником широкополосного коротковолнового излучения на системе полос молекул XeCl , KrCl , Cl_2 ($D'-A'$), Cl_2^{**} в спектральном диапазоне 180–330 nm; наиболее оптимальными для работы эксимерно-галогенного излучателя были смеси $P(\text{Kr})/P(\text{Xe})/P(\text{Cl}_2) = (150-200)/(150-200)/(20-40)$ Pa; источник имеет две планарные апертуры общей площадью $\leq 100 \text{ cm}^2$, средняя мощность излучения достигает 30–40 W; в припороговой по величине напряжения зажигания разряда обнаружены узкие пики суммарного излучения плазмы, которые могут быть связаны с образованием скачков плотности электронов и ионов на границе „плазма–слой“ поперечного высокочастотного разряда.

Список литературы

- [1] Головицкий А.П., Кан С.Н. // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 3. С. 604–609.
- [2] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 3. С. 279–280.
- [3] Lomaev M.I., Tarasenko V.F. // SPIE. 2002. V. 4747. P. 390–398.
- [4] Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 2. С. 43–46.
- [5] Головицкий А.П. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 6. С. 63–67.

- [6] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 11. С. 1176–1188.
- [7] Шуаибов А.К., Даценко А.И., Шевера И.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 6. С. 23–28.
- [8] Шуаибов А.К., Даценко А.И., Шевера И.В. // Укр. физ. журн. 2002. Т. 47. № 4. С. 346–349.
- [9] Shuaibov A.K., Shimon L.L., Laschenko A.I., Shevera I.V. // Journ. of Phys. Stud. 2001. V. 5. N 2. P. 131–138.
- [10] Шуаибов А.К., Даценко А.И., Шимон Л.Л., Шевера И.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 16. С. 85–89.
- [11] Дацюк В.В., Измайлов И.А., Кочелап В.А. // УФН. 1998. Т. 168. № 4. С. 439–464.
- [12] Головицкий А.П., Лебедев С.В. // Опт. и спектр. 1997. Т. 82. № 2. С. 251–255.
- [13] Швейгерт В.А. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. В. 7. С. 844–854.
- [14] Каганович И.Д., Цендин Л.Д. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. В. 10. С. 1229–1240.
- [15] Каганович И.Д. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 5. С. 434–441.