

04;07;12

Высокочастотный эксиплексно-галогенный источник ультрафиолетового излучения на смеси аргон—ксенон—хлор

© А.К. Шуайбов, И.В. Шевера, И.А. Грабовая

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

(Поступило в Редакцию 8 июня 2007 г.)

Представлены результаты исследования, эксиплексно-галогенного источника спонтанного ультрафиолетового (УФ) излучения с возбуждением поперечным высокочастотным разрядом. Рабочей средой в источнике являются смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$ низкого давления (100–1000 Па). Рабочий спектральный диапазон источника 220–450 нм. Спектр излучения формируется на основе полос 235 нм $\text{XeCl}(D-X)$, 257 нм $\text{Cl}_2(D'-A')$, 306 нм $\text{XeCl}(B-X)$, 390 нм $\text{XeCl}(C-A)$, 430 нм $\text{XeCl}(B-A)$. Приведены результаты оптимизации мощности УФ-излучения в зависимости от давления, парциального состава смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$ и мощности возбуждения.

PACS: 52.80.Hc

Введение

При возбуждении газовой смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$ ($P = 1-5$ кПа) в продольном тлеющем разряде постоянного тока возможно получить излучение в спектральном диапазоне 160–310 нм. Апертура такой лампы является цилиндрической, а мощность УФ-излучения ≤ 3 Вт [1]. Для ряда применений в микроэлектронике, химии высоких энергий, фотометрии и экологии представляет интерес разработка широкополосной ультрафиолетовой (УФ) лампы, излучение которой не поглощается воздухом ($\Delta\lambda = 200-300$ нм), а выходная апертура является плоской. Это позволяет проводить равномерное облучение плоских поверхностей мощным УФ-излучением.

Для разработки такого излучателя может быть использован поперечный высокочастотный разряд (ПВЧР), у которого значительная часть ($\geq 50\%$) разрядного объема составляют яркие приэлектродные слои [2]. По своей физической природе они являются аналогами отрицательного катодного свечения тлеющего разряда постоянного тока, применение которого в эксиплексно-галогенных лампах (рабочие смеси типа $\text{Kr}-\text{Cl}_2$, $\text{He}-\text{Cl}_2$) достаточно эффективно [3,4]. Слаботочный высокочастотный разряд индукционного типа в смеси ксенона с хлором при давлениях, меньших 500 Па, позволил разработать эффективный безртутный излучатель с цилиндрической рабочей апертурой и суммарной мощностью УФ-излучения $W \leq 1$ Вт [5]. Условия образования эксиплексных молекул и возбужденных молекул хлора, а также оптические характеристики сильноточного ПВЧР емкостного типа в подобных рабочих средах неизвестны.

В настоящей статье приводятся результаты исследования излучения плазмы поперечного высокочастотного разряда на смеси аргона, ксенона и хлора.

Условия и техника эксперимента

Поперечный разряд в смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$ формировался в объеме $17 \times 3 \times 2.2$ см (где 2.2 см — межэлектродное расстояние). Система электродов состояла из массивного никелированного электрода длиной 17 см с радиусом закругления рабочей поверхности 3 см и плоского электрода из листового никеля с рабочей поверхностью 5×17 см. Электроды были установлены внутри разрядной камеры из кварца с внутренним объемом 3×10^3 см³. Излучение разряда отбиралось линзой с торцевого участка плазменной среды и исследовалось при помощи монохроматора МДР-2 и фотоумножителя ФЭУ-106. Монохроматор и ФЭУ были предварительно откалиброваны по величине относительной спектральной чувствительности при помощи ламп СИ 8-200У и ДВС-25. Для регистрации временных характеристик суммарного излучения разряда применялись импульсный ФЭУ „Фотон“ и осциллограф С1-99. Зажигание высокочастотного разряда проводилось при помощи источника модулированного высокочастотного напряжения со средней мощностью ≤ 300 Вт. Источник возбуждения генерировал импульсы напряжения длительностью до 12 мс (по основанию осциллограммы), заполненные высокочастотной составляющей ($f = 1.76$ МГц). Для исключения „батарейного“ эффекта [6] подсоединение высокочастотного напряжения к металлическому электроду проводилось через емкость $C_0 = 200$ пФ. Измерение полной мощности УФ-излучения с двух боковых апертур излучателя проводилось по методике, описанной в работе [7].

Разрядная камера предварительно пассивировалась в хлоре. Остаточное давление газов в разрядной камере не превышало 5–10 Па. В эксперименте применялся ксенон спектральной чистоты, а аргон и хлор были технической чистоты.

Характеристики источника ультрафиолетового излучения

Спектральные характеристики высокочастотного источника излучения в УФ и видимом диапазонах представлены на рис. 1. Электронно-колебательные полосы 235 nm XeCl($D-X$) (1), 257 nm Cl₂($D'-A'$) (2) и 306 nm XeCl($B-X$) (3) были сильно уширены, что привело к их взаимному перекрытию и образованию основного континуума излучения в спектральном диапазоне 220–310 nm. В длинноволновой части спектра обнаружено излучение широких полос малой яркости с максимумами при 390 nm XeCl($C-A$) и 430 nm XeCl($B-A$). Ширина полосы $C-A$ была примерно в 2.5–3.0 раза больше ширины полосы хлорида ксенона $B-A$. Перекрытие всех полос излучения молекул XeCl* и Cl₂ позволило получить излучение во всем спектральном диапазоне 220–450 nm. Такой вид спектров излучения плазмы обусловлен характером протекания колебательной релаксации в пределах возбужденных электронных состояний молекул XeCl и Cl₂ при низкой плотности рабочей среды [8]. По сравнению со спектрами излучения газоразрядной плазмы на смеси Ar–Xe–Cl₂ при атмосферном давлении максимумы полос излучения молекул XeCl* и Cl₂ были сдвинуты в коротковолновую область спектра, а сами полосы сильно уширены.

Излучение в видимом диапазоне спектра ($\lambda \geq 450$ nm) определялось наиболее интенсивными спектральными линиями атомов ксенона, из которых особенно выделялась спектральная линия 467.1 nm XeI($6s-7p$).

Исследование зависимости мощности УФ-излучения лампы на смесях Xe–Cl₂ и Ar–Xe–Cl₂ от величины парциального давления хлора при постоянном парциальном давлении $P(\text{Xe}) = 100-400$ и $P(\text{Ar}) = 100-1200$ Pa показало, что оптимальное значение $P(\text{Cl}_2)$ составляет 30–40 Pa. Оптимальная величина $P(\text{Xe})$ в ПВЧР на смеси Xe–Cl₂ находится в диапазоне 300–400 Pa. Увеличение $P(\text{Ar})$ в разряде на смеси Ar–Xe–Cl₂

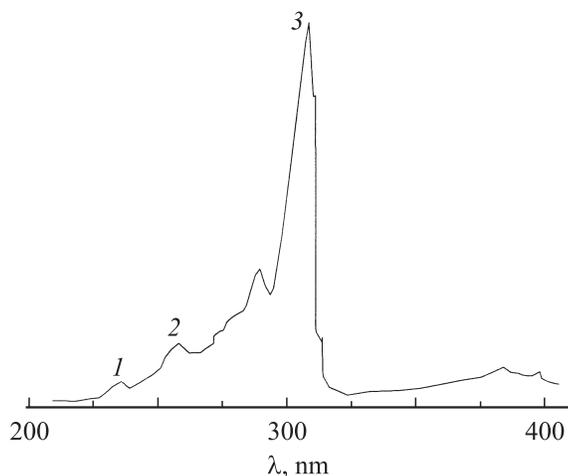


Рис. 1. Спектр излучения плазмы ПВЧР в смеси Ar–Xe–Cl₂ с парциальными давлениями 200–40–80 Pa.

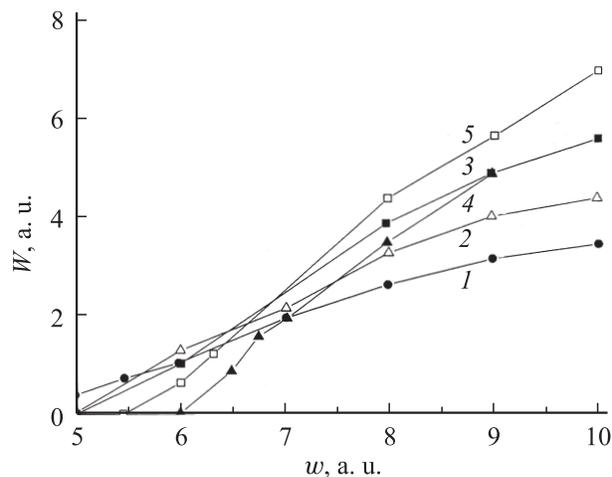


Рис. 2. Зависимость суммарной мощности излучения плазмы (W) от величины мощности источника питания разряда (w) на смесях с парциальными давлениями $P(\text{Xe})-P(\text{Cl}_2) = 80-40$ (1), $P(\text{Ar})-P(\text{Xe})-P(\text{Cl}_2) = 80-80-40$ (2), $160-80-40$ (3), $320-80-40$ (4) и $400-80-40$ (5) Pa.

от 160 до 1200 Pa приводит к увеличению мощности УФ-излучения в четыре раза (рис. 2). С повышением мощности источника питания разряда наблюдается близкое к линейному увеличению мощности УФ-излучения лампы (рис. 2). При максимальной мощности источника высокочастотного напряжения мощность УФ-излучения ПВЧР на смеси Ar–Xe–Cl₂ (рис. 2, кривая 4) в два раза выше мощности излучения лампы на основе смеси Xe–Cl₂. Оптимальное парциальное давление ксенона в лампе на основе тройной газовой смеси находится в диапазоне 80–150 Pa. Полная мощность УФ-излучения лампы на смесях с парциальным давлением $P(\text{Ar})-P(\text{Xe})-P(\text{Cl}_2) = (1000-1200)-(80-150)-(30-40)$ Pa достигает 30–40 W.

Временные характеристики высокочастотного источника излучения на смеси Ar–Xe–Cl₂ представлены на рис. 3. Величина амплитуды полуволны тока высокой частоты достигала 1.6 A, а ее длительность по основанию осциллограммы составляла 320 ns. Между напряжением на электродах и током ПВЧР наблюдался сдвиг по фазе, который увеличивался с повышением давления смесей Xe–Cl₂, Ar–Xe–Cl₂. Излучение плазмы разряда было представлено в основном постоянной составляющей, которая была модулирована по амплитуде с удвоенной частотой тока возбуждения. Максимумы излучения плазмы высокочастотного разряда проявились на участках спада и увеличения высокочастотной составляющей тока (рис. 3, кривая 2). Вклад постоянной составляющей излучения в суммарное излучение лампы возрастал при увеличении $P(\text{Ar})$ и $P(\text{Xe})$. Наличие постоянной составляющей излучения связано с непрерывным во время действия высокочастотного напряжения поддержанием „гарпунного“ канала образования молекул XeCl(B, C, D), что возможно, если плотность

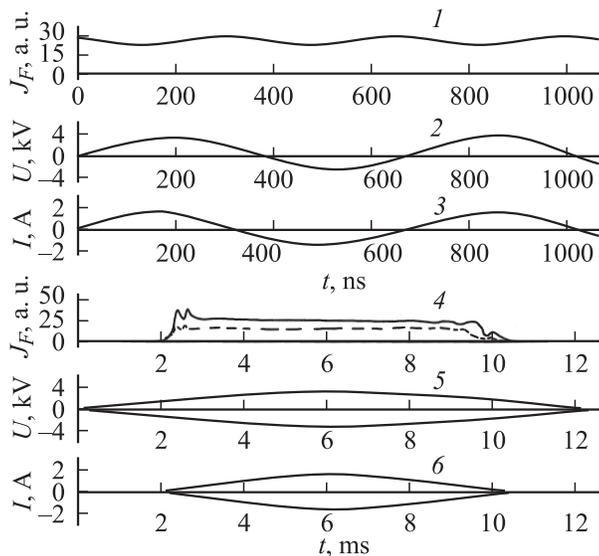


Рис. 3. Осциллограммы излучения (J_F), напряжения на разрядном промежутке (U) и тока плазмы ПВЧР (I) в смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$ с парциальными давлениями 200–80–80 Па ($1-3$ — микрохарактеристики, $4-6$ — усредненные характеристики).

метастабильных атомов ксенона поддерживается в это время на определенном стационарном уровне.

На переднем фронте макроимпульса излучения обнаружены два узких максимума. Во время действия высокочастотного напряжения интенсивность усредненного во времени УФ-излучения слабо убывала (рис. 3), что, вероятно, обусловлено перегревом рабочей смеси в разряде. В газостатическом режиме работы без применения принудительного охлаждения электродов ресурс работы излучателя не превышал 30–40 мин. Устойчивая работа излучателя была возможна при замене рабочей среды в процессе работы излучателя со скоростью 0.1–0.5 л/мин.

Как было установлено в работе [9], в высокочастотном разряде среднего давления, который зажигается в электроотрицательной газовой среде, формируются скачки плотности электронов, положительных и отрицательных ионов. Скачки образуются на границе раздела „плазма–слой“ высокочастотного разряда. Скачку плотности электронов в исследуемой плазме соответствует скачок плотности метастабильных атомов ксенона, которые при взаимодействии с молекулами хлора приводят к образованию скачка плотности эксиплексных молекул и УФ-излучения при их спонтанном распаде.

Таким образом, исследование выходных характеристик источника УФ-излучения с возбуждением поперечным высокочастотным разрядом газовой смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$ показало, что излучатель работает в спектральном диапазоне 220–450 нм, а его спектр формируется на основе полос 235 нм $\text{XeCl}(D-X)$, 257 нм $\text{Cl}_2(D'-A')$, 306 нм $\text{XeCl}(B-X)$, 390 нм $\text{XeCl}(C-A)$ и 430 нм $\text{XeCl}(B-A)$; наиболее оптимальными для

получения максимальной яркости УФ-излучения были газовые смеси с парциальными давлениями $P(\text{Xe})-P(\text{Cl}_2) = (300-400)-(30-400)$ Па и $P(\text{Ar})-P(\text{Xe})-P(\text{Cl}_2) = (1200-800)-150-(30-40)$ Па; максимальная величина полной мощности УФ-излучения находится в диапазоне 30–40 Вт; излучение плазмы разряда имеет постоянную и высокочастотную составляющие; на основе поперечного высокочастотного разряда в смеси $\text{Ar}-\text{Xe}-\text{Cl}_2$ возможна разработка эффективной эксиплексно-галогенной ультрафиолетовой лампы с двумя планарными апертурами.

Список литературы

- [1] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. № 5. С. 753–755.
- [2] Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. № 11. С. 1476–1488.
- [3] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 6. С. 23–28.
- [4] Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В. // УФЖ. 2002. Т. 47. С. 346–349.
- [5] Головицкий А.П. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 6. С. 63–68.
- [6] Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 533 с.
- [7] Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В. // ПТЭ. 2002. № 1. С. 104–106.
- [8] Дацюк В.В., Измайлов И.А., Кочелав В.А. // УФН. 1998. Т. 168. № 4. С. 439–459.
- [9] Каганович И.Д. // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 5. С. 434–441.