

04;07;12

Продольный высокочастотный разряд в смеси ксенона с хлором

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

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

(Поступило в Редакцию 19 июня 2003 г.)

Представлены результаты исследования электрических и эмиссионных характеристик низкотемпературной плазмы продольного высокочастотного ($f_0 = 1.76 \text{ MHz}$) разряда в смеси ксенона и хлора при давлении 100–800 Па. Разряд зажигался в цилиндрической разрядной трубке из кварца с внутренним диаметром 1.4 см и межэлектродным расстоянием 3.0 см. Излучение разряда анализировалось в спектральной области 190–670 нм. Изучалась динамика протекания тока и излучения разряда в смесях ксенона с хлором при разных давлениях и составах рабочей среды. Показано, что исследуемый разряд в смеси ксенон/хлор является широкополосным эксимерно-галогенным излучателем с основным спектральным диапазоном работы 220–320 нм и цилиндрической рабочей апертурой. Широкополосный спектр излучения плазмы формируется в результате перекрытия уширенных при низком давлении газовой среды полос $\text{XeCl}(D, B-X; B, C-A)$. Определен оптимальный состав рабочей смеси, необходимый для получения максимальной мощности широкополосного УФ излучения плазмы. Продольный высокочастотный разряд низкого давления в смеси ксенона и хлора представляет интерес для использования в малогабаритной широкополосной ($\Delta\lambda = 220\text{--}450 \text{ nm}$) лампе с цилиндрической рабочей апертурой, которая в среднем более чем на порядок может быть эффективней от традиционных водородных ламп.

Введение

Мощные и эффективные источники спонтанного ультрафиолетового и вакуумного-ультрафиолетового (УФ–ВУФ) излучения на электронно-колебательных полосах моногалогенидов Ar, Kr и Xe находят в настоящее время все более широкие применения в микроэлектронике, химии высоких энергий, экологии, биотехнологиях и медицине [1,2]. Для накачки ламп низкого и среднего давления наиболее часто используется тлеющий, а также емкостной и барьерный разряды [3–7]. Предельная частота следования импульсов излучения на переходах монохлоридов и монобромидов тяжелых инертных газов не превышает 100–200 kHz. Ограничение частоты сверху обусловлено преимущественно применяемыми источниками питания ламп, работа которых базируется на использовании тиратронов и таситронов. С целью увеличения частоты повторения импульсов УФ излучения, а также устойчивости разряда в электроотрицательной газовой среде перспективным является применение высокочастотного питания разрядного промежутка эксимерно-галогенной лампы низкого давления. Так, в [8] описаны параметры лампы на хлориде ксенона с накачкой слаботочным высокочастотным разрядом через кварц. Для увеличения мощности малогабаритной лампы с цилиндрической рабочей апертурой представляет интерес использование сильноточного продольного высокочастотного разряда с оголенными электродами в смеси Xe/Cl_2 .

Техника эксперимента

Схема эксимерно-галогенного излучателя с цилиндрической рабочей апертурой представлена на рис. 1.

Сильноточный высокочастотный разряд (разряд γ -типа) зажигался в цилиндрической разрядной трубке из кварца. Внутренний диаметр разрядной трубки составлял 1.4 см, а межэлектродное расстояние в лампе равнялось 3.0 см. В эксперименте использовались полые цилиндрические электроды из никеля длиной 1.5 см и внешним диаметром 1.4 см. Продольный высокочастотный разряд зажигался с применением модулированного по амплитуде ($f \leq 50 \text{ Hz}$) высокочастотного генератора напряжения марки ЭН-57М. Рабочая частота данного источника составляла $f_0 = 1.76 \text{ MHz}$. Средняя мощность источника ЭН-57М не превышала 250 W. Напряжение на электроды лампы подавалось через импульсный разделительный конденсатор КВИ-2 емкостью 200 pF. Амплитуда высокочастотного напряжения достигала 5–6 kV. В режиме медленной продольной прокачки смесь ксенона с хлором прокачивалась через разрядную трубку со скоростью 0.1 л/мин. Система и методика регистрации

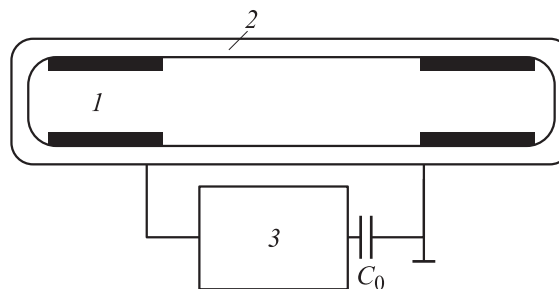


Рис. 1. Схема эксимерно-галогенной лампы с накачкой продольным высокочастотным разрядом низкого давления: 1 — электроды, 2 — разрядная трубка, 3 — источник модулированного напряжения высокой частоты, C_0 — разделительный конденсатор.

характеристик продольного высокочастотного разряда были такие же, как и в наших предыдущих работах [9–11]. Излучение на головку измерителя мощности спонтанного излучения „Кварц-01“ поступало через светофильтр УФС-5, отсекающий видимое и инфракрасное излучение. Регистрация импульсов суммарного излучения плазмы проводилась с помощью фотоумножителя „Фотон“ и импульсного осциллографа С1-99. УФ излучение плазмы на фотоумножитель „Фотон“ подавалось также через светофильтр УФС-5.

Излучение плазмы отбиралось в продольном направлении (направлении между электродами) через один из полых электродов. В этом случае в поле зрения фотоумножителя попадает излучение как приэлектродных слоев так и плазмы положительного столба.

Излучение плазмы разряда

Основное излучение плазмы продольного высокочастотного разряда в смеси Xe/Cl_2 было сконцентрировано в полосах с максимумами при 307 нм $\text{XeCl}(B-X)$ и 236 нм $\text{XeCl}(D-X)$ (рис. 2). При низком давлении газовой смеси в лампе процесс колебательной релаксации в пределах D - и B -состояний хлорида ксенона незавершен [12]. При этом $B-X$ - и $D-X$ -полосы молекулы XeCl сильно уширены, перекрываются между собой и полосой с максимумом при 257 нм $\text{Cl}_2(D'-A')$, что приводит к формированию единого континуума в спектральном диапазоне 220–320 нм. По сравнению с лампами атмосферного давления [13–15] основные максимумы излучения $\text{XeCl}(B-X)$ были смещены в более коротковолновый диапазон и проявлялись при $\lambda = 307$ и 289 нм. Уменьшение парциального давления ксенона в смеси с 500 до 50 Па приводило к уменьшению яркости УФ излучения плазмы. В спектральном диапазоне 320–450 нм наблюдались две менее яркие широкие полосы излучения с максимумом при $\lambda = 390$ и 430 нм. Они отождествлены соответственно с $C-A$ - и $B-A$ -переходами молекулы XeCl . Ширина полосы $\text{XeCl}(C-A)$ была примерно в два-три раза больше, чем

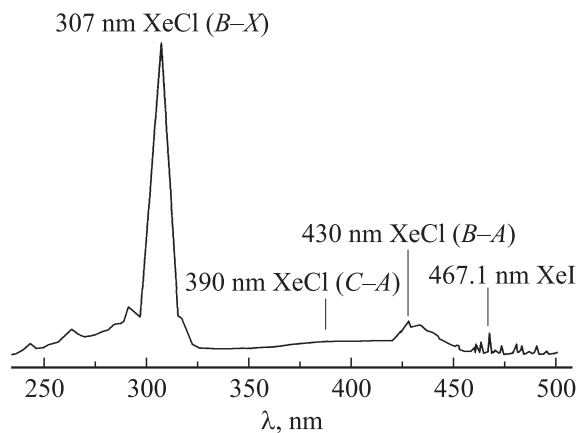


Рис. 2. Спектр излучения электроразрядной плазмы на основе смесей ксенона с хлором при давлении 100–500 Па.

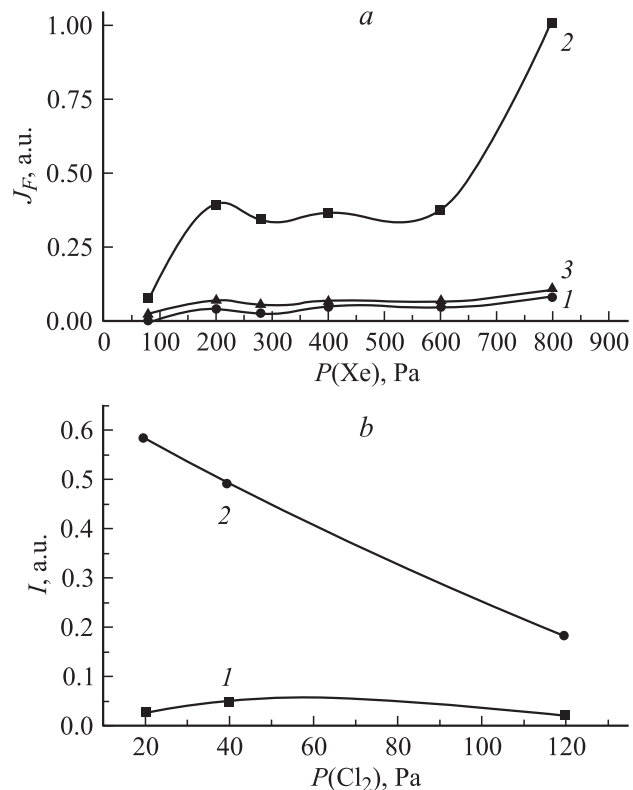


Рис. 3. Зависимость яркости излучения полос 236 нм $\text{XeCl}(D-X)$ (1), 306 нм $\text{XeCl}(B-X)$ (2) и 430 нм $\text{XeCl}(B-A)$ (3) от величины парциального давления ксенона при $P(\text{Cl}_2) = 80$ Па (a) и парциального давления хлора при $P(\text{Xe}) = 280$ Па (b).

полосы $\text{XeCl}(B-X)$. На основе всех базовых полос излучения молекулы хлорида ксенона сформирован единый континуум в спектральном диапазоне 220–450 нм. В видимом диапазоне спектра излучение плазмы определялось преимущественно спектральными линиями атома ксенона, наиболее интенсивной из которых была линия 467.1 нм $\text{XeI}(6s-7p)$ (рис. 2).

Результаты оптимизации яркости полос излучения $\text{XeCl}(D, B-X; B-A)$ в зависимости от давления и парциального состава смеси Xe/Cl_2 представлены на рис. 3. Наиболее оптимальными для получения максимальной яркости излучения хлорида ксенона было парциальное давление $P(\text{Xe}) = 600\text{--}800$ Па (при $P(\text{Cl}_2) = 80$ Па), а при небольшом фиксированном давлении ксенона $P(\text{Xe}) = 280$ Па наиболее оптимальным было парциальное давление хлора 20–40 Па.

Динамика изменения тока (I) и суммарного излучения (J_F) продольного высокочастотного разряда в смесях ксенона с хлором представлены на рис. 4 и 5. В верхней части рис. 4 и 5 приведены осциллограммы тока высокой частоты и суммарного излучения плазмы в субмикросекундном диапазоне времен, а в нижней части рисунков представлены усредненные за период высокочастотных колебаний ток и излучение плазмы, изменение которых во времени связано с низкочастот-

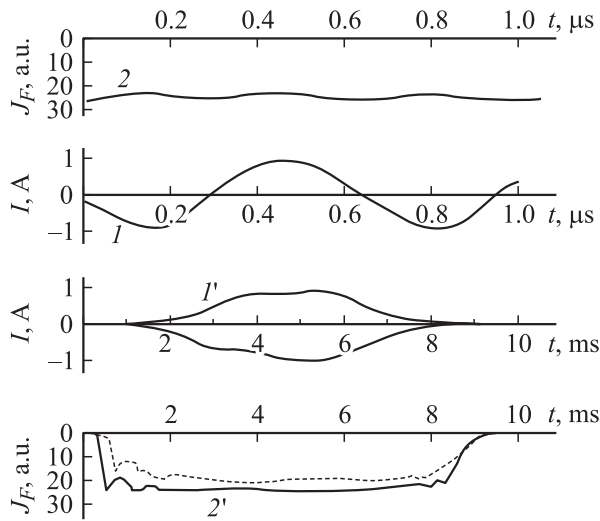


Рис. 4. Осциллограммы тока (I, I') и суммарного УФ излучения ($2, 2'$) плазмы продольного высокочастотного разряда в смеси $P(\text{Xe})/P(\text{Cl}_2) = 400/20$ Па (где $I, 2$ — высокочастотные составляющие тока и излучения; $I', 2'$ — соответствующие усредненные за период высокочастотных колебаний величины). Пунктир — постоянная составляющая излучения.

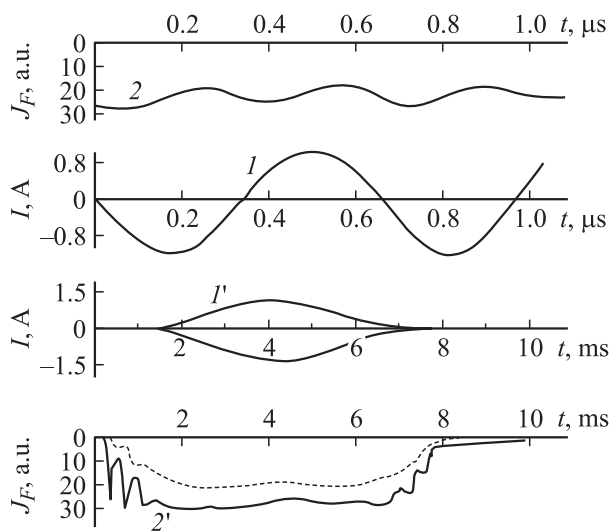


Рис. 5. Осциллограммы тока (I, I') и излучения плазмы ($2, 2'$) на смеси $P(\text{Xe})/P(\text{Cl}_2) = 400/80$ Па. Пунктир — постоянная составляющая излучения.

ной модуляцией амплитуды высокочастотного напряжения источника ЭН-57 М. На рис. 4 и 5 представлены только осциллограммы усредненного тока, соответствующие сильноточной стадии высокочастотного разряда. Величина тока слабوتочной стадии разряда при $t = 0-2$ и $7-9$ ms была слишком низкой и нами не фиксировалась. Величина амплитуды полуволны высокочастотного тока достигала 1 А, а ее длительность составляла 300 ns. Излучение плазмы характеризовалось преимущественно постоянной составляющей. При этом излучение было

модулировано по амплитуде с частотой, которая была равна удвоенной частоте тока высокочастотной накачки. Вклад пульсирующей составляющей излучения плазмы увеличивался с ростом парциального давления хлора в смеси Xe/Cl₂. Максимумы излучения плазмы (рис. 4 и 5) соответствовали участкам спада и увеличения высокочастотной составляющей тока исследуемого разряда.

При низком давлении смеси Xe/Cl₂ в тлеющем, емкостном или высокочастотном разряде одной из основных является „гарпунная“ реакция молекул XeCl* [7,16,17]. В приэлектродных слоях высокочастотного разряда эффективно образуются также положительные и отрицательные ионы [18], в результате рекомбинации которых в этой ион-ионной плазме могут образовываться молекулы XeCl*, Cl₂*, в процессе спонтанного распада которых и формируется континуум в спектральном диапазоне 220–450 nm.

Для непрерывного поддержания этих каналов образования излучающих частиц наиболее важным является канал „гарпунной“ реакции, для которого необходимо наличие стационарной во времени плотности метастабильных атомов (Xe, Cl). Такая ситуация может быть реализована в продольном высокочастотном разряде, когда плотность метастабильных атомов не уменьшается до нуля при изменении направления высокочастотной составляющей тока, а поддерживается на определенном стационарном уровне.

Из рассмотрения усредненных за период высокочастотных колебаний тока и излучения плазмы (нижняя часть рис. 4 и 5) следует, что на переднем и заднем фронтах макроимпульсов излучения формируются два-три четко выраженных узких максимума. Максимальная длительность макроимпульсов излучения уменьшается с 7 до 6 ms при увеличении парциального давления хлора с 20 до 80 Па. Пиковая структура на фронтах макроимпульса излучения становится более четко выраженной с увеличением $P(\text{Cl}_2)$.

Максимальная мощность широкополосного УФ излучения разряда со всей боковой апертуры лампы находилась в диапазоне 15–20 W, а КПД лампы не превышал 10%. Ресурс работы излучателя в газостатическом режиме не превышал 30–40 min. Он существенно увеличивался при медленной продольной прокачке рабочей среды со скоростью ≤ 0.1 l/min. При использовании принудительного воздушного охлаждения разрядной трубки, „горячей“ пассивировки в хлоре высокой чистоты ресурс работы лампы может быть доведен до нескольких сотен часов, что соответствует данным для лампы на системе полос XeCl*/Cl₂* с накачкой продольным тлеющим разрядом постоянного тока.

Заключение

Исследование характеристик продольного высокочастотного разряда на смеси Xe/Cl₂ выявило, что он является широкополосным излучателем в спектральном

интервале 220–450 nm; превалирующим является излучение при $\lambda = 307$ nm XeCl(B–X); основным физическим процессом, приводящим к сдвигу максимума УФ полос излучения в коротковолновый диапазон, является колебательная релаксация; излучение плазмы характеризовалось преимущественно постоянной составляющей, а вклад переменной составляющей был незначительным и увеличивался с ростом парциального давления хлора в смеси; в околопороговых областях по величине тока разряда обнаружены узкие максимумы суммарного излучения плазмы; наиболее оптимальными для получения максимальной мощности УФ излучения были газовые смеси $P(\text{Xe})/P(\text{Cl}_2) = 600\text{--}800/20\text{--}40$ Па.

Список литературы

- [1] *Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W.* // Pure Appl. Chem. Vol. 71. N 10. P. 1819–1829.
- [2] *Sosnin E.A., Batalova V.N., Slepchenko G.B.* // SPIE. 2001. Vol. 4747. P. 352–357.
- [3] *Головицкий А.П.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 73–76.
- [4] *Панченко А.Н., Соснин Э.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 20. С. 77–80.
- [5] *Шуаибов А.К., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // Квантовая электрон. 2001. Т. 31. № 4. С. 371–372.
- [6] *Шуаибов А.К.* // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 10. С. 138–142.
- [7] *Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А.* и др. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [8] *Головицкий А.П.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 6. С. 63–67.
- [9] *Шуаибов А.К., Шимон Л.Л., Дащенко А.И., Шевера И.В.* // ПТЭ. 2002. № 1. С. 104–106.
- [10] *Shuaibov A.K., Shimon L.L., Dashchenko A.I., Shevera I.V.* // J. Phys. Stud. 2001. Vol. 5. N 2. P. 131–138.
- [11] *Shuaibov A., Shimon L., Dashchenko A., Shevera I.* // SPIE. 2001. Vol. 4747. P. 409–416.
- [12] *Дацюк В.В., Измайлов И.А., Кочелап В.А.* // УФН. 1998. Т. 168. № 4. С. 439–464.
- [13] *Шуаибов А.К.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. Вып. 12. С. 64–67.
- [14] *Шуаибов А.К.* // ТВТ. 1999. Т. 37. № 2. С. 188–193.
- [15] *Шуаибов А.К.* // Опт. и спектр. 2000. Т. 88. № 5. С. 875–879.
- [16] *Головицкий А.П., Кан В.Ф.* // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 3. С. 604–609.
- [17] *Головицкий А.П., Лебедев С.В.* // Опт. и спектр. 1997. Т. 82. № 2. С. 251–255.
- [18] *Каганович И.Д.* // Физика плазмы. 1995. Т. 21. № 5. С. 431–441.