

УДК 537.525.1

Стационарный источник УФ-ВУФ-излучения с накачкой продольным разрядом

А. К. Шуаибов, Л. Л. Шимон, И. В. Шевера, А. И. Дашенко
Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, Украина

Представлены результаты оптимизации стационарного источника излучения в области 130–280 нм с накачкой продольным разрядом постоянного тока. Рабочей средой источника излучения служил фреон-12 (CF_2Cl_2) при давлении 0,13–0,67 кПа. Разряд зажигался в цилиндрической разрядной трубке с внутренним диаметром 5 мм и межэлектродным расстоянием 100 мм. Исследовались вольт-амперные характеристики, мощность вкладываемая в плазму, спектры излучения, зависимости яркости основных полос излучения от давления фреона-12 и разрядного тока. Показано, что суммарная мощность излучения разряда в УФ-ВУФ-диапазоне длин волн достигает 1,0–1,5 Вт при КПД 2–3 %.

Электроразрядные источники ультрафиолетового излучения с накачкой продольным тлеющим разрядом, работающие на смеси He/Cl_2 и излучающие на полосе 258 нм [1] по своим выходным характеристикам приближаются к эксилампам низкого давления [2–5]. При этом они имеют ряд преимуществ: отсутствие в составе рабочей среды дорогостоящих инертных газов (Kr, Xe), ответственных за контрагирование тлеющего разряда при увеличении удельного энерговклада и давления рабочей газовой смеси. Это особенно важно для разработки ламп с продольной прокачкой рабочей среды на основе смесей инертных и галогеносодержащих газов. В таком режиме даже при сравнительно медленной прокачке газовой смеси наблюдается увеличение энергетических характеристик, снижаются требования к системе охлаждения излучателя и он может стабильно работать продолжительное время. Возможность получения непрерывного излучения эксимерных молекул при возбуждении тлеющим разрядом сверхзвуковых газовых потоков на основе смесей He/Xe и $He/HCl(Cl_2)$ при их смешении рассматривалась в работе [6], где основной акцент делался на разработку непрерывных эксимерных лазеров. Из-за низкой плотности эксимерных молекул в плазме тлеющего разряда реальными стали только разработки эксимерных ламп постоянного тока [1–3]. Актуальным при этом остается вопрос освоения ВУФ-области спектра, поскольку для некоторых применений в промышленных технологиях, фотохимии и медицине необходимы мощные источники непрерывного излучения, работающие в диапазоне длин волн 200–140 нм. Кроме эксилампы постоянного тока на системе полос с $\lambda_{max} = 175$ нм $AgCl/258$ нм Cl_2 ($D'-A'$) [4] и источника излучения на основе продуктов диссоциации молекул воды с $\lambda = 140$ –190 нм [7] в ВУФ-области спектра возможно использование излучения возбужденных продуктов распада молекул CF_2Cl_2 , которые нами наблюдались в поперечном объемном разряде в смеси Ar/CF_2Cl_2 .

В настоящей работе приведены результаты исследования характеристик УФ-ВУФ-источника излучения с накачкой продольным разрядом рабочей среды на основе фреона-12.

Разряд постоянного тока зажигался в сапфировой или кварцевой трубке. Внутренний диаметр трубки равнялся 5 мм, а межэлектродное расстояние

составляло 100 мм. Трубчатые анод и катод излучателя были изготовлены из никелевой фольги и имели длину 10 мм и внешний диаметр 5 мм. Спектральный анализ излучения плазмы проводился через открытый торец разрядной трубки с полыми электродами с использованием вакуумного монохроматора. Спектральное разрешение вакуумного монохроматора в диапазоне 130—350 нм составляло 0,7 нм. Монохроматор совместно с фотоумножителем ФЭУ-142 был откалиброван по величине относительной спектральной чувствительности. Другие условия эксперимента и используемая аппаратура были аналогичны описанным в наших работах [4, 5, 7]. В работе изучались вольт-амперные характеристики (ВАХ), мощность, вкладываемая в разряд, спектры излучения плазмы, зависимости яркости полос излучения от давления фреона-12 и тока разряда, а также энергетические характеристики и КПД излучателя. За яркость излучения принималась площадь под соответствующей кривой на диаграммной ленте самописца, которая была исправлена в соответствии с относительной чувствительностью вакуумного спектрографа.

При $P(\text{CF}_2\text{Cl}_2) \geq 0,1$ кПа продольный разряд существует только в контрагированном виде и представляет собой плазменный шнур диаметром 1—2 мм, который не соприкасается с внутренней поверхностью разрядной трубки. Ресурс работы хлорсодержащих электроразрядных приборов определяется коэффициентом диффузии хлора в стекло, который значительно увеличивается с ростом температуры стеклянной трубки и является основной причиной его уменьшения [9]. Поэтому хотя при контрагировании и происходит уменьшение рабочей площади поверхности источника излучения, но он представляет интерес с точки зрения увеличения ресурса работы и упрощения системы охлаждения лампы. Дополнительный интерес к исследованию характеристик контрагированного разряда в электроотрицательных газах связан с тем, что там формируется ион-ионная плазма, в которой практически отсутствуют свободные электроны [10, 11].

На рис. 1 приведены ВАХ контрагированного продольного разряда при разных давлениях фреона-12. Поднормальная стадия разряда, когда зависимость величины U_{ch} является спадающей [12], наблюдалась при малых токах ($I_{ch} \leq 10$ мА). С увеличением тока разряд переходил в нормальный режим горения, когда U_{ch} практически не зависит от величины тока. С увеличением давления фреона-12 от 0,13 до 0,67 кПа квазистационарное значение U_{ch} увеличивалось с 1,7 до 2,5 кВ, а потенциал зажигания разряда возрастал от 2,0 до 3,5 кВ. Величина мощности, вкладываемой в плазму, увеличивалась с ростом давления фреона-12 и достигала 45—65 Вт (рис. 2). Изменение тока с 2 до 50 мА приводило к линейному росту электрической мощности разряда от 5 до 65 Вт (см. рис. 2).

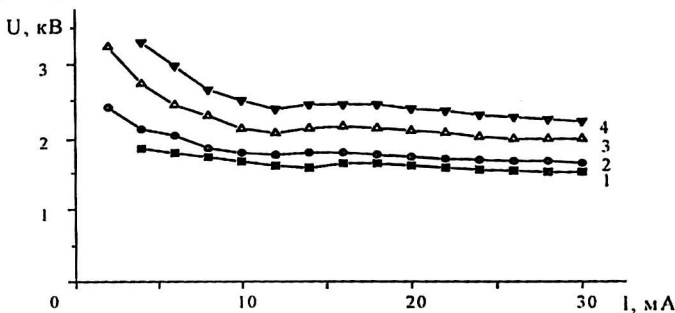


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики плазменного разряда во фреоне-12 при давлениях, кПа:

1 — 0,13; 2 — 0,40; 3 — 0,47; 4 — 0,67

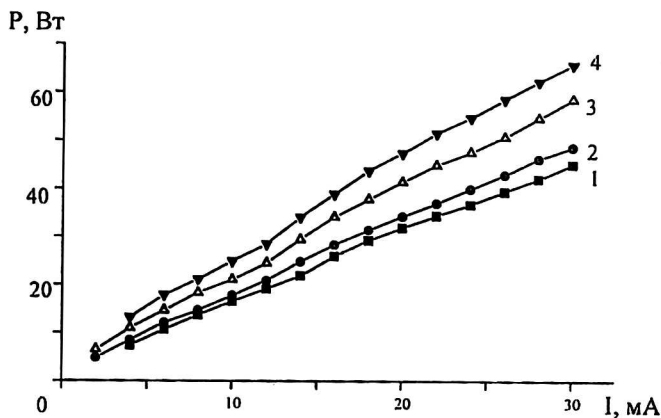


Рис. 2. Зависимость мощности, вкладываемой в продольный разряд на фреоне, от величины тока при $P(\text{CF}_2\text{Cl}_2)$, кПа:
 1 — 0,13; 2 — 0,40; 3 — 0,47; 4 — 0,67

Спектр излучения электроразрядной плазмы фреона-12 представлен на рис. 3. В спектрах УФ-ВУФ-плазмы основным было излучение полос молекулы хлора с 258 и 200 нм. В диапазоне 130—170 нм на фоне полос излучения Cl_2^{**} наблюдалось также излучение отдельных спектральных линий иона Cl^{+} . Отождествление спектров проводилось по данным таблиц [13, 14]. Наиболее интенсивными в линейчатом спектре были группы неразрешенных спектральных линий 156,5 нм $\text{Cl}^+(3d^5D^0_{0,1,2,3,4} - 5f^5F_{1,2,3,5})$, 161,9 нм $\text{Cl}^+(3d^5D^0_{3,4} - 6p^5P_{2,3})$ и 173,1 нм $\text{Cl}^+(3d^3D^0_3 - 5p^3D_3)$. Энергия верхнего состояния ионов хлора находится в диапазоне 21—22 эВ, а нижнего — 13—15 эВ. На основе данных групп неразрешенных спектральных линий иона Cl^+ формировалась наиболее коротковолновая часть спектра излучения плазмы.

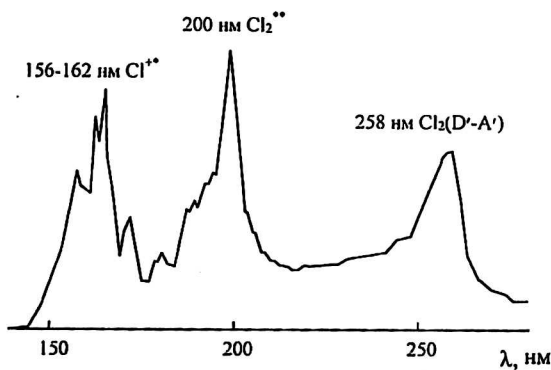


Рис. 3. Спектр излучения плазмы тлеющего разряда в среде фреона-12

Оптимальное давление фреона-12 находится в диапазоне 100—250 Па (рис. 4). При увеличении давления фреона-12 ($P \geq 250$ Па) наблюдался спад интенсивности излучения на переходах Cl^+ и суммарной яркости всего УФ-ВУФ-излучения, что, вероятно, связано с сильным контрагированием продольного разряда. Наиболее вероятными процессами образования возбужденных молекул хлора в ион-ионной плазме является рекомбинация ионов Cl^+ и Cl^- . Небольшая часть положительных ионов может существовать в форме ионов

Cl^{2+} , рекомбинация которых с отрицательными ионами хлора или малым количеством электронов может приводить к образованию возбужденных ионов Cl^+ , которые при спонтанном распаде и формируют излучение в диапазоне 130—173 нм.

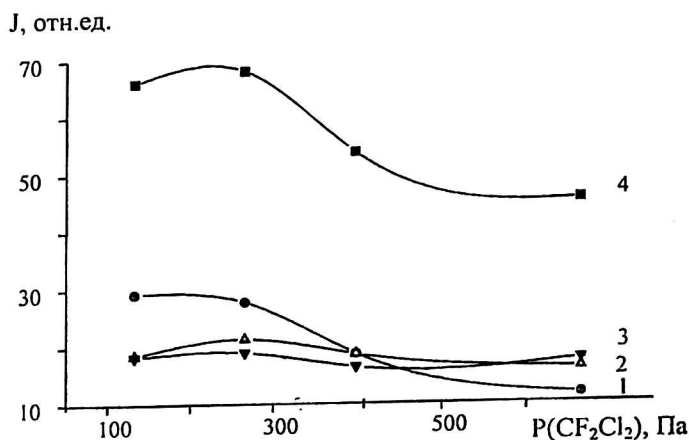


Рис. 4. Зависимости яркости излучения тлеющего разряда от давления фреона в спектральных диапазонах, нм: 1 — 130—175; 2 — 175—215; 3 — 215—280; 4 — 130—280 — суммарная яркость всего УФ-ВУФ-излучения

Увеличение разрядного тока в пределах 1—30 мА приводило к примерно одинаковому и близкому к линейному росту всех составляющих спектра УФ-ВУФ (рис. 5). Уменьшение давления фреона-12 с 0,67 до 0,13 кПа наиболее сильно сказывалось на зависимости интенсивности спектральных линий Cl^+ и было значительно слабее для полосы 200 нм Cl_2^{**} .

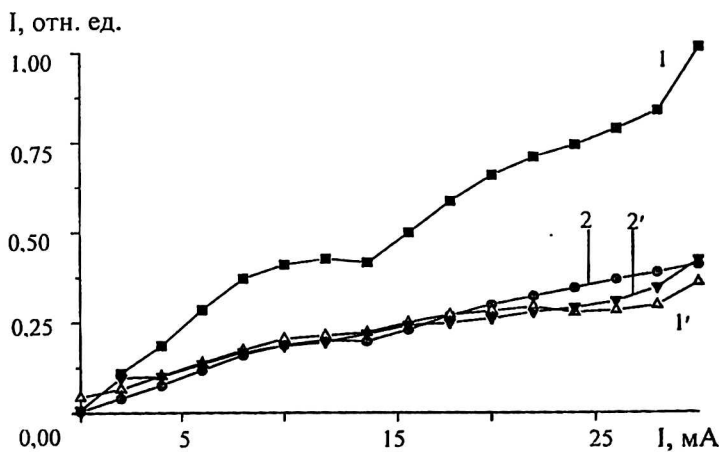


Рис. 5. Зависимость величины интенсивности излучения в области максимума от тока тлеющего разряда при: 1 — $P(\text{CF}_2\text{Cl}_2) = 0,13$ кПа и $\lambda = 173$ нм; 1' — $P(\text{CF}_2\text{Cl}_2) = 0,67$ кПа и $\lambda = 173$ нм; 2 — $P(\text{CF}_2\text{Cl}_2) = 0,13$ кПа и $\lambda = 200$ нм; 2' — $P(\text{CF}_2\text{Cl}_2) = 0,67$ кПа и $\lambda = 200$ нм

Насыщение скорости роста яркости (интенсивности) УФ-ВУФ-излучения в условиях настоящего эксперимента не проявлялось, хотя специальные меры по охлаждению разрядной трубки с фреоном-12 не предпринимались. Для эксилампы постоянного тока с $\lambda_{\text{max}} = 175$ АгСl нм/258 нм $\text{Cl}_2(\text{D}'-\text{A}')$, рабо-

тающей на смеси Ar/Cl_2 и при близких условиях накачки [4], ограничения яркости излучения (вызванные перегревом) проявлялись уже при $I_{ch} \geq 20$ мА. Для разработки лампы на основе фреона-12 с диапазоном работы 130—280 нм может быть перспективной накачка продольной высокоскоростной волной ионизации при небольших частотах повторения ($f \leq 50$ —100 Гц), но при этом плазма существует в виде импульсного объемного разряда наносекундной длительности. Для паров CCl_4 такой способ накачки электроразрядного источника излучения был успешно реализован в работе [15], но эти исследования выполнялись только в УФ-области спектра ($\lambda \geq 210$ нм).

Ресурс УФ-ВУФ-излучателя в газостатическом режиме работы составлял 30 мин для $\lambda = 258$ нм Cl_2^* и излучения ионов Cl^+ , а для полосы 200 нм Cl_2^{**} он достигал 60—70 мин. За это время яркость излучения уменьшалась в два раза. Поэтому при скорости продольной прокачки фреона-12 на уровне $v \leq 0,3$ —0,5 л/мин возможно получение стабильного по величине мощности УФ-ВУФ-излучения. Средняя мощность излучения в диапазоне 130—280 нм со всей боковой поверхности плазменного шнура достигала 1,5 Вт. КПД лампы, рассчитанный от величины мощности, вкладываемой в разряд, достигал 3 %.

Таким образом, исследование характеристик контрагированного продольного разряда в фреоне-12 показало, что он является источником излучения в области 175—280 нм, которое сформировано на основе полос 258 и 200 нм молекул хлора и линейчатого излучения ионов Cl^+ ($\Delta\lambda = 130$ —175 нм); оптимальное давление фреона-12 находится в пределах 100—250 Па; в диапазоне разрядных токов 2—30 мА наблюдалось примерно линейное увеличение яркости излучения без признаков насыщения; ресурс работы в газостатическом режиме составлял 30—70 мин, что открывает возможности разработки стационарных источников УФ-ВУФ-излучения со слабой ($v \leq 0,5$ л/мин) продольной прокачкой фреона-12; средняя мощность излучения в диапазоне не превышала 1,5 Вт при КПД ≤ 3 %; активной средой лампы является ионная плазма на основе продуктов диссоциации молекул CF_2Cl_2 , которая представляет интерес для исследования механизмов образования возбужденных молекул и положительных ионов хлора, а также численного моделирования характеристик продольного разряда в фреоне.

Литература

1. Панченко А. Н., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. и др.// Письма в ЖТФ. 1995. Т. 21. Вып. 20. С. 77.
2. Головицкий А. П.//Там же. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 73.
3. Панченко А. Н., Тарасенко В. Ф.//Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 84. № 3. С. 389.
4. Шуаибов А. К., Даценко А. Й., Шевера И. В.//Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 4. С. 371.
5. Шуаибов А. К., Даценко А. Й., Шевера И. В.//ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 8. С. 121.
6. Михельсоо В. Т., Трещалов А. Б., Пезт В. Э., Явисте Э. Х. и др.//Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 7. С. 1404.
7. Шуаибов А. К., Шимон Л. Л., Даценко А. Й., Шевера И. В.//Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 15. С. 46.
8. Шуаибов А. К., Шимон Л. Л., Даценко А. Й., Шевера И. В.//ТВТ. 2000. Т. 38. № 3. С. 386.
9. Светцов В. И., Куприяновская А. Л., Марычев А. Б.//ЖПС. 1981. Т. 35. Вып. 2. С. 205.
10. Бычков Ю. И., Горохов С. Л., Ястремский А. Г.//Квантовая электроника. 2000. Т. 30. № 8. С. 733.

11. Кудрявцев А. А., Курапов А. Л., Мишаков В. Г., Ткаченко Т. Л. и др. //ЖТФ. 2001. Т. 71. Вып. 3. С. 29.
12. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.
13. Pears R. W. B. and Gajdon A. G. The Identification of Molecular Spectra. — London. Chapman Hall LTD, 1963.
14. Стриганов А. Р., Одишова Г. А. Таблицы спектральных линий атомов и ионов: Справочник. — М., 1982.
15. Василяк Л. М., Костюченко С. В., Красночуб, Кузьменко М. Е. //ЖПС. 1998. Т. 65. № 2. С. 302.

Fixed source UV-VUV of radiation with pumping by longitudinal discharge

A. K. Shuaibov, L. L. Shimon, I. V. Shevera, A. I. Dashchenko
Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine

The outcomes of optimization of a fixed stimulus source are submitted (shown) in the field of 130–280 nm with pumping by longitudinal discharge of a direct current. Working environment of a stimulus source was served with freon-12 (CF₂Cl₂) at pressure 0,13–0,67 kPa. The discharge was fired in a cylindrical digit handset with a minor diameter of 5 mm and interelectrode distance of 100 mm. The spectra of radiation, relation of brightness of main(basic) bands of radiation to pressure freon-12 and digit current were investigated a volt-amper of the characteristic, power put in plasma. Is shown, that the total power of radiation of discharge in UV-VUV-range of lengths of waves reaches (achieves) 1,0–1,5 W at efficiency 2–3 %.