

04;07;12

## Многоволновая эксимерная лампа на молекулах XeF/XeCl/KrF/KrCl

© А.К. Шуаибов

Ужгородский государственный университет,  
294660 Ужгород, Украина

(Поступило в Редакцию 6 октября 1997 г.)

Приводятся результаты исследования спектральных и временных характеристик электроразрядной эксимерной лампы, излучающей одновременно на переходах 351 nm XeF, 308 nm XeCl, 249 nm KrF и 222 nm KrCl. Рабочие смеси типа He/Kr/Xe/SF<sub>6</sub>/HCl возбуждались в поперечном разряде с искровой УФ предыонизацией при общем давлении 25–100 кПа. Для получения одинаковой яркости на переходах эксимерных молекул соотношение плотностей [Kr]/[Xe] составляло 8/0.8 кПа, а галогенсодержащих молекул [SF<sub>6</sub>]/[HCl] = [0.06–0.12]/[0.08–0.16] кПа. Длительность импульсов излучения на переходах эксимерных молекул при атмосферном давлении находилась в пределах 100–200 ns, а при уменьшении общего давления смесей до 250 кПа она увеличивалась в 2–3 раза. Ресурс спонтанного излучения на B–X-переходах эксимерных молекул достигал 10<sup>5</sup> импульсов.

### Введение

Источники интенсивного спонтанного излучения многогалогенидов инертных газов (RX) наряду с соответствующими лазерными излучателями с  $\lambda = 190–350$  nm находят широкое применение в микроэлектронике, химии высоких энергий, биологии и медицине. В [1] указывалось на использование импульсных эксимерных ламп для накачки газовых лазеров. Конструкции данных источников проще лазерных и там, где не требуется использование высоких пространственных или спектральных характеристик УФ излучения RX, а также если нет необходимости в транспортировке излучения на большие расстояния, они могут успешно конкурировать с эксимерными лазерами.

До настоящего времени основное внимание уделялось исследованию соответствующих лазерных сред, а изучению импульсного спонтанного излучения RX большого значения не придавалось. Для создания активной среды эксимерных ламп (ЭЛ) эффективно применяются разные виды импульсных объемных разрядов, в том числе и поперечных с УФ предыонизацией [2–7]. Рабочими средами при этом являются смеси типа He(Ne)/R/M, где R — Ag, Kr, Xe; M — F<sub>2</sub>, NF<sub>3</sub>, HCl, BCl<sub>3</sub> и др. с составами, близкими к применяемым в электроразрядных RX лазерах: но область рабочих давлений в них существенно шире — 1–300 кПа. Созданные электроразрядные эксимерные лампы излучают на одной длине волны, а многоволновой режим их работы, когда в состав рабочей среды входят два рабочих инертных газа (типа Kr и Xe и др.) и два различных галогенносителя, не исследовался. В многоволновых электроразрядных RX-лазерах изучались, как правило, режимы работы с одним галогенносителем и разными рабочими инертными газами [8,9]. В работе [10] указывалось на несовместимость наиболее эффективного фторносителя (F<sub>2</sub>) и хлорносителя (HCl) между собой, что, вероятно, связано с быстрой конверсией молекул фтора в HF, и вызванное этим процессом снижение эффективности и ресурса генерации на RF(B–X).

В [11,12] лазерная генерация на RF(B–X) была получена в поперечном разряде на смесях с малоагрессивным галогенносителем SF<sub>6</sub>. Ресурс работы лазера на смесях типа He/R/SF<sub>6</sub> был при этом существенно выше, чем для соответствующих сред на основе молекул F<sub>2</sub>. Реакции замещения и образования HF в смесях с SF<sub>6</sub> и HCl также менее эффективны, чем в соответствующих средах на основе молекул F<sub>2</sub>. Поэтому для одновременного образования молекул RF и RCl были выбраны галогенносители SF<sub>6</sub> и HCl.

В настоящей работе представлены результаты исследования спектральных и временных характеристик активной среды эксимерной лампы, работающей одновременно на четырех длинах волн: 351 nm XeF, 308 nm XeCl, 249 nm KrF и 222 nm KrCl.

### Условия и техника эксперимента

ЭЛ имела объем активной среды  $18 \times 2.2 \times (0.5–1.0)$  см, который получался при помощи поперечного разряда (ПР) с искровой УФ предыонизацией. Межэлектродное расстояние в ПР 2.2 см. При выводе излучения с торца активной среды ЭЛ обеспечивала на расстоянии 10 см однородную засветку площадки диаметром 4 см. Система УФ предыонизации позволяла также выводить излучение апертурой  $20 \times 2$  см, что представляет интерес для накачки газовых лазеров. Боковая УФ предыонизация от искровых линеек, установленных вблизи катода, имела плотность 1 искровой разрядник на 1.8 см длины разрядной области [13].

Генератор высоковольтных импульсов изготовлен на основе двухконтурной LC-схемы перезаряда емкостей [14]. Накопительная емкость включала три конденсатора К15–10 и имела величину 30 nF. Обострительная емкость состояла из конденсаторов КВИ-3 и имела величину 9.4 nF. Коммутатором системы питания был водородный тиратрон ТГИ1-1000/25.

Использование модуля поперечной электрической прокачки рабочей смеси позволяло работать в импульсно-периодическом режиме с частотами следования импульсов накачки 5–50 Hz. В модуле прокачки применялся отрицательный коронный разряд в системе электродов "один ряд иголок-сетка" при межэлектродном расстоянии 2 см. Более детально модуль прокачки описан в работе [15].

Импульсы тока и напряжения измерялись с помощью пояса Роговского и малоиндуктивного емкостного делителя напряжения. Спектры излучения плазмы ПР исследовались с применением монохроматора МДР-2, ФЭУ "Фотон", электрической системы регистрации редкоповторяющихся импульсов излучения и самописца КСП-4. Временные характеристики излучения плазмы измерялись электронным линейным множителем ЭЛУ 14-ФС. Импульсные измерения проводились одновременно на разных каналах осциллографа БЛОР-04. Оценки мощности суммарного УФ излучения ЭЛ проводились при помощи ИМО-2Н на расстоянии 8 см от переднего торца активной среды. С учетом характера зависимости интенсивности излучения ЭЛ от расстояния [5] мощность излучения вблизи активной среды (на расстоянии 2 см) при  $U_c \geq 15$  kV может достигать 20–50 kW. Такие выходные характеристики многоволновой ЭЛ приближаются к полученным в [4–6], где также применялась накачка импульсным наносекундным разрядом рабочих сред одноволновых ЭЛ.

## Характеристики излучения плазмы

В работе проведено исследование спектральных и временных характеристик излучения ПР в смеси He/Kr/Xe/SF<sub>6</sub>/HCl при общем давлении 25–100 kPa. Отождествление излучения на переходах эксимерных молекул проведено по данным [16,17]. На рис. 1 представлен типичный обзорный спектр излучения ПР в видимой, а на рис. 2 в УФ области. Различие величины интенсивности излучения в видимой и УФ областях достигало двух порядков. В области 400–500 nm линейчатый спектр наблюдался на фоне широкой полосы XeF(C-A). Он характеризовался наиболее интенсивными линиями атомов криптона и ксенона в основном на переходах Kr(5s-6p) и Xe(6s-7p). Наиболее интенсивные линии KrI и XeI были подобны линиям, наблюдавшимся в ПР на смеси He/Kr/Xe/HCl [15], где приведена детальная расшифровка спектра излучения плазмы в видимой области. Из линий буферного газа не наблюдалась только линия  $\lambda = 587.6$  nm HeI. Преобладающее заселение состояния 3<sup>3</sup>D атома He, являющегося верхним для данного перехода, в [18] связывается с перемешиванием состояний HeI электронами разряда, так как константа скорости данной реакции отрицательна и данный уровень играет роль акцептора.

Спектр на рис. 2 представлен без учета спектральной чувствительности системы регистрации. Для условий

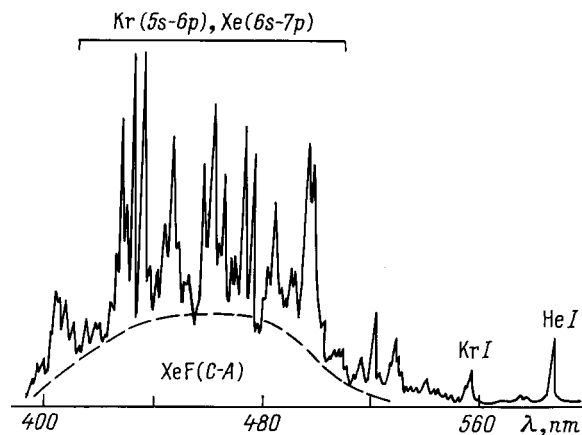


Рис. 1. Обзорный спектр излучения плазмы ПР на смеси He/Kr/Xe/SF<sub>6</sub>/HCl = 92/8/0.8/0.12/0.08 kPa.

регистрации данного спектра с учетом спектральной чувствительности системы монохроматор + ФЭУ были измерены относительные яркости полос излучения на В-Х-переходах KrCl, KeF, XeCl, XeF. Яркости полос определялись как площадь под соответствующей спектральной кривой на диаграммной ленте. Яркости полос 222 nm KrCl, 249 nm KrF, 308 nm XeCl, 351 nm XeF в данных условиях составили соответственно 3.8, 2.1, 6.1, 4.1 а.у. Увеличение содержания молекул SF<sub>6</sub> вы-

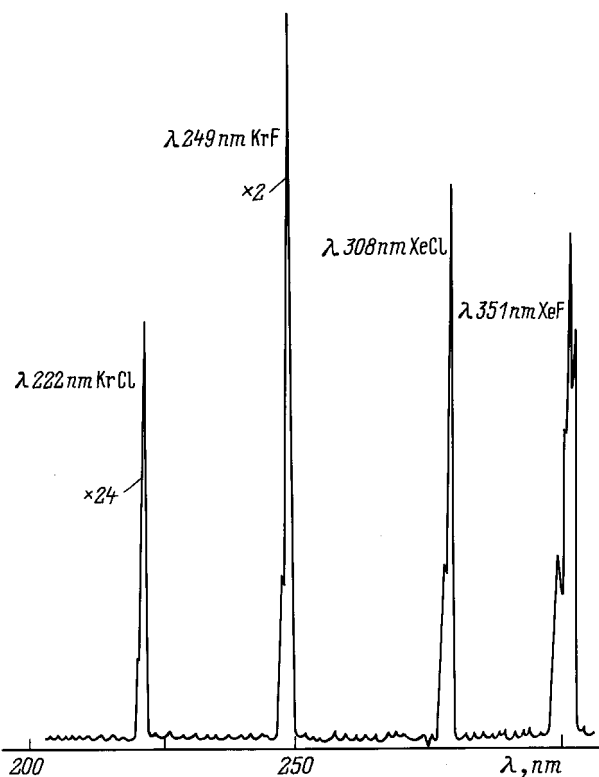
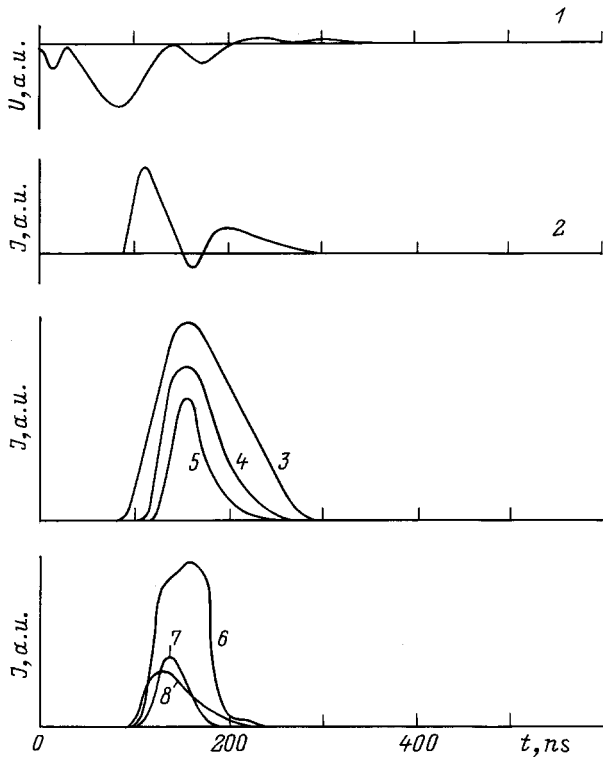


Рис. 2. Спектр излучения плазмы ПР на смеси He/Kr/Xe/SF<sub>6</sub>/HCl = 92/8/0.8/0.12/0.16 kPa в УФ области при  $U_{ch} = 15$  kV.

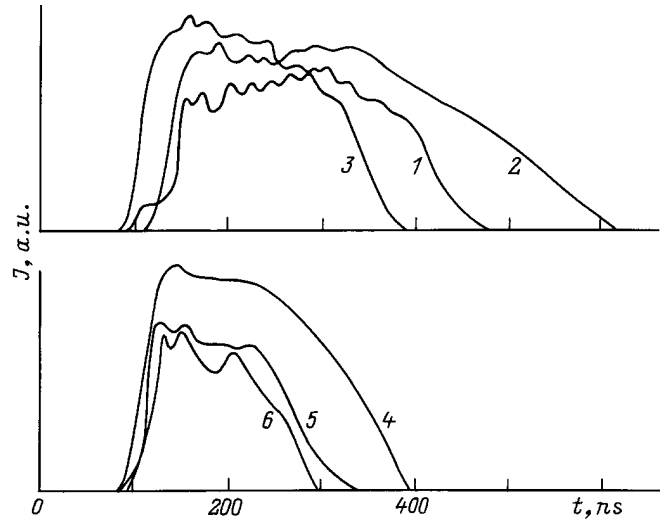
ше 0.12 кПа приводило к появлению неоднородностей ПР. В начальный период работы на свежеприготовленной смеси из-за наличия в среде сильно электроотрицательных молекул наблюдалась недозарядка накопительного конденсатора системы питания ПР, как при работе с молекулами фтора [19]. По прошествии некоторого времени, соответствующего наработке  $5-7 \cdot 10^3$  импульсов, молекулы  $SF_6$  в плазме ПР разлагались и эффект недозарядки рабочего конденсатора исчезал. Ресурс работы смеси определялся начиная с данного момента времени при частоте следования импульсов 3–5 Hz. Изучение зависимостей яркости излучения полос  $RX (B-X)$  от количества импульсов тока ПР в свежеприготовленной смеси показало, что она уменьшается в 3–4 раза после  $1-0.5 \cdot 10^5$  импульсов.

Увеличение плотности молекул  $HCl$  выше 0.1–0.2 кПа приводило к превалированию излучения на переходах  $KrCl$  и  $XeCl$ . Для примерно одинаковой яркости полос излучения эксимеров на основе  $Xe$  и  $Kr$  соотношение плотностей криптона и ксенона составляло 8/0.8 кПа, что примерно соответствовало одинаковой мощности генерации на системе полос 222 nm  $KrCl$ /308 nm  $XeCl$ , наблюдавшейся в ПР на смеси  $He/Kr/Xe/HCl$  [8,9].

Осциллограммы напряжения, тока и излучения молекул  $RX$  в ПР на смесях  $He/Kr/Xe/SF_6/HCl$  приведены на рис. 3 и 4. В диапазоне зарядных напряжений 10–20 кВ



**Рис. 3.** Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и излучения (3–8) ПР на смеси  $He/Kr/Xe/SF_6/HCl = 92/8/0.8/0.12/0.04$  кПа: 3 — 351 nm  $XeF (B-X)$ , 4 — 308 nm  $XeCl (B-X)$ , 5 — 264 nm  $XeF (D-X)$ , 6 — 249 nm  $KrF (B-X)$ , 7 — 222 nm  $KrCl (B-X)$ , 8 — 587 nm  $HeI$ .



**Рис. 4.** Осциллограммы излучения плазмы ПР на смеси  $He/Kr/Xe/SF_6/HCl = 25/8/0.8/0.04/0.04$  кПа: 1 —  $XeF (B-X)$ , 2 —  $XeCl (B-X)$ , 3 —  $XeF (D-X)$ , 4 —  $KrF (B-X)$ , 5 —  $KrF (D-X)$ , 6 —  $KrCl (B-X)$ .

величина тока в импульсе составляла 5–15 кА. Импульс тока ПР состоял из двух максимумов. Длительность первого из них по основанию не превышала 50 ns. Излучение эксимерных молекул достигало максимума в ближнем послесвечении ПР. Наиболее короткими импульсы излучения на переходах  $RX (B-X)$  были при атмосферном давлении рабочей смеси — 100–200 ns по основанию. Длительность излучения молекул  $XeX$  при этом была в 1.5–2 раза больше, чем  $KrX$ . Излучение на переходе  $XeF (D-X)$  задержано во времени примерно на 20–25 ns по сравнению с излучением полосы  $XeF (B-X)$  и его длительность была ниже. При пониженном давлении смеси и уменьшенном содержании галогенсодержащих молекул ( $SF_6$ ,  $HCl$ ) в ПР наблюдалось существенное увеличение (в 2–3 раза) длительности импульсов излучения  $RX$  (рис. 4). Причинами такого увеличения длительности излучения может быть уменьшение эффективности тушения  $RX$  галогенсодержащими молекулами или продуктами их распада, а также увеличение длительности существования однофазной стадии ПР [20,21].

## Выводы

Исследование оптических характеристик многоволновой эксимерной лампы на системе полос 222 nm  $KrCl$  / 249 nm  $KrF$  / 308 nm  $XeCl$  / 351 nm  $XeF$ , работающей при возбуждении смеси  $He/Kr/Xe/SF_6/HCl$  наносекундным поперечным разрядом с искровой УФ предыонизацией, показало, что равенство (в пределах  $\pm 25\%$ ) относительных яркостей всех эксимерных полос достигается при содержании молекул  $SF_6$  (0.04–0.12) кПа,  $HCl$  (0.1–0.2) кПа и отношении плотностей  $[Kr]/[Xe] = 10$ ; ресурс работы данной среды до-

стигал  $10^5$  импульсов; варьированием содержания молекул  $SF_6$  и  $HC1$  в смеси можно регулировать длительность импульсов излучения на переходах  $RX (B-X)$  в пределах 100–400 ns; данный источник кроме применений в фотохимии, медицине и биологии может использоваться и для калибровки спектральной аппаратуры в диапазоне длин волн 222–351 nm.

## Список литературы

- [1] Басов Ю.Г. Источники накачки микросекундных лазеров. М.: Энергоатомиздат, 1990. 240 с.
- [2] Gerber T., Luthy W., Burkhard P. // Opt. Commun. 1980. Vol. 35. N 2. P. 242–244.
- [3] Kitagai H., Obara M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. Vol. 16. N 4. P. 453–458.
- [4] Коваль Б.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. и др. // ПТЭ. 1992. № 4. С. 224–245.
- [5] Бойченко А.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. и др. // Квантовая электрон. 1993. Т. 20. № 6. С. 613–615.
- [6] Панченко А.Н., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 1. С. 78–82.
- [7] Бойченко А.М., Скакун В.С., Соснин Э.А. и др. // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. № 4. С. 344–348.
- [8] Shusen M., Yongbang Y., Xinxin Sh. // Rev. Roum. Phys. 1986. Vol. 31. P. 881–884.
- [9] Chaltakov I.V., Minkovski N.I., Mirtshev T.P., Tomov I.V. // Opt. and Quant. Electron. Lett. 1988. Vol. 20. P. 215–218.
- [10] Атежеев В.В., Букреев В.С., Варпанетов С.К. и др. // Краткие сообщения по физике. 1987. № 9. С. 19–21.
- [11] Ищенко В.Н., Лисицын В.Н., Ражев А.М. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. С. 839–841.
- [12] Ражев А.М. // Материалы XII Науч. конф. молодых исследователей. Новосибирск, 1978. С. 123–128.
- [13] Шуаибов А.К., Неймет Ю.Ю., Ходанич А.И., Шеева В.С. // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 4. С. 713–716.
- [14] Шуаибов А.К., Миня А.И. // ЖПС. 1997. Т. 64. № 4. С. 523–527.
- [15] Шуаибов А.К., Миня А.И., Звенигородский В.В., Шеева В.С. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. Вып. 13. С. 73–78.
- [16] Эксимерные лазеры / Под ред. Ч. Роудза. М.: Мир, 1981. 245 с.
- [17] Газовые лазеры / Под ред. Т. Мак-Даниэля, У. Нигэна. М.: Мир, 1986. 548 с.
- [18] Пиотровский Ю.А., Толмачев Ю.П. // Опт. и спектр. 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 33–38.
- [19] Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. Электро-разрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
- [20] Мельниченко С.В., Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электрон. 1984. Т. 11. № 7. С. 1490–1492.
- [21] Месяц Г.А., Осипов В.В., Тарасенко В.Ф. Импульсные газовые лазеры. М.: Наука, 1991. 272 с.