

Изучение объемного разряда в галогенидах инертных газов без источника предыонизации

М.В.Ерофеев, В.Ф.Тарасенко

Исследованы энергетические характеристики излучения галогенидов инертных газов, возбуждаемых объемным разрядом без источника дополнительной предыонизации. Определены оптимальные давления рабочих смесей и соотношения между инертным газом и галогеном с точки зрения получения максимальных импульсной плотности мощности и эффективности излучения. Пиковые плотности мощности излучения в УФ диапазоне спектра достигали 5 кВт/см^2 при эффективности $\sim 5.5\%$. При этом длительности импульсов излучения на полувысоте были равны 30–40 нс.

Ключевые слова: возбуждение объемным разрядом без источника дополнительной предыонизации, излучение галогенидов инертных газов.

1. Введение

Импульсные источники некогерентного спонтанного ультрафиолетового (УФ) и вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучений, возбуждаемые различными типами разрядов, продолжают вызывать интерес ученых. Так, в [1] сообщается об исследовании импульсных эксиламп, возбуждаемых емкостным, тлеющим и импульсным самостоятельным разрядами с УФ предыонизацией. Показано, что максимальные плотности мощности излучения достигаются в объемном разряде высокого давления, формируемом в планарной эксилампе с УФ предыонизацией разрядного промежутка. При давлении смеси несколько атмосфер плотности мощности излучения на $\lambda = 250 \text{ нм}$ составили 5 кВт/см^2 , на $\lambda = 222$ и 308 нм – 3.5 кВт/см^2 . Кроме того отмечено, что наибольший срок службы имеет безэлектродная эксилампа емкостного разряда. В работе [2] были исследованы амплитудно-временные характеристики излучения КгСl-эксиламп емкостного разряда различной геометрии. Максимальные импульсные плотности мощности излучения составили 300 Вт/см^2 при длительности импульса излучения на полувысоте несколько десятков наносекунд и рабочих давлениях до 100 Тор . В работах [3–5] были исследованы эксилампы высокого давления на димерах ксенона Xe_2^* , возбуждаемые барьерным разрядом с расстоянием между барьерами в несколько миллиметров. При частоте следования импульсов 50 кГц получена пиковая плотность мощности 6 Вт/см^2 на $\lambda \sim 172 \text{ нм}$ при длительности импульса излучения на полувысоте $\sim 150 \text{ нс}$.

В работах [2, 6–8] показано, что длительность импульса излучения определяется давлением и составом рабочей смеси, длительностью импульса возбуждения и его переднего фронта. В работах [9, 10] исследовались ХеСl-, КгСl-, ХеВг- и КгВг-эксилампы барьерного раз-

ряда, возбуждаемые высоковольтным генератором наносекундных импульсов. Длительности импульсов излучения составили 4 нс при импульсной плотности мощности излучения до 700 Вт/см^2 . Существует также несколько работ [11–15], посвященных исследованию характеристик излучения плазмы объемного наносекундного разряда в инертных газах, азоте и воздухе, формируемого при повышенном давлении в неоднородном электрическом поле без предварительной ионизации разрядного промежутка. Длительности импульсов излучения составляют от нескольких десятков до нескольких сотен наносекунд. Наибольшие импульсные мощности и плотности мощности излучения были получены на переходах димеров инертных газов [14, 15].

Цель настоящей работы – исследование энергетических характеристик импульсов излучения галогенидов инертных газов (XeCl , KrCl , XeBr и KrBr), возбуждаемых объемным разрядом без источника дополнительной предыонизации при повышенных давлениях рабочих смесей. Излучательные характеристики эксиплексных и эксимерных молекул подобны, поэтому в данных условиях можно ожидать получения высоких плотностей мощности излучения на галогенидах инертных газов.

2. Экспериментальная установка и методика

Для исследования разряда в указанных галогенидах инертных газов использовалась газоразрядная камера (рис.1) с внутренним диаметром 36 мм . Разряд зажигался между плоским латунным анодом 1, соединенным с корпусом камеры через токовый шунт 3 из чип-резисторов (типоразмер 2010), и катодом 2, изготовленным в виде трубки из стальной фольги. Расстояние между анодом и катодом могло изменяться от 5 до 15 мм . Импульс высокого напряжения с длительностью переднего фронта $\sim 1 \text{ нс}$, амплитудой $\sim 150 \text{ кВ}$ и длительностью на полувысоте $\sim 1.5 \text{ нс}$ (при работе на согласованную нагрузку от генератора РАДАН-150, подробно описанного в [16]) подавался на катод через изолятор 5 с частотой следования 1 Гц . Для регистрации напряжения на разрядном промежутке использовался емкостный делитель напря-

М.В.Ерофеев, В.Ф.Тарасенко Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

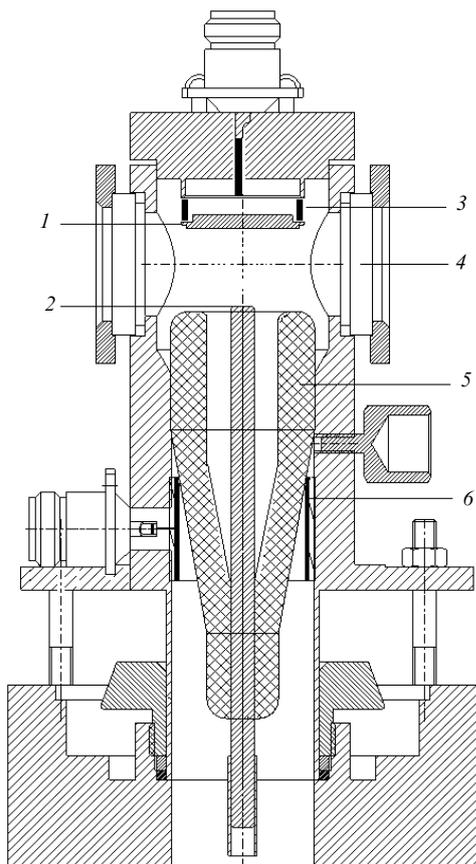


Рис.1. Конструкция газоразрядной камеры: 1 – анод; 2 – катод; 3 – токовый шунт; 4 – кварцевое окно; 5 – изолятор; 6 – емкостной делитель напряжения.

жения 6. Регистрация импульса излучения осуществлялась вакуумным фотодиодом ФЭК-22 СПУ с известной спектральной чувствительностью. Сигнал с фотодиода подавался на четырехлучевой осциллограф Tektronix TDS-6604 с полосой пропускания 6 ГГц, 20 Gs/s. Мощность излучения измерялась на выходном окне газоразрядной камеры, спектр излучения разряда регистрировался спектрометром StellarNet EPP2000-C25.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Исследования проводились в диапазоне давлений рабочих смесей 60–750 Тор при различных соотношениях инертного газа и галогена. Импульсная мощность излучения плазмы объемного разряда росла с увеличением межэлектродного промежутка, однако внутренний диаметр камеры ограничивал его величину – при межэлектродном расстоянии более 12 мм происходило шунтирование разряда на корпус камеры. При низких давлениях (60–120 Тор) и межэлектродном расстоянии 12 мм разряд представлял собой однородное диффузное свечение конической формы. С ростом давления разряд приобретал вид диффузного канала диаметром ~3 мм, который при давлении выше 500 Тор контрагировал и переходил в искру. При увеличении содержания галогена в рабочей смеси контракция наступала при более низких давлениях и мощность излучения уменьшалась. Максимальные плотности мощности излучения объемного разряда в смесях Xe–Cl₂, Kr–Cl₂, Xe–Br₂ были получены при давлении 500 Тор и соотношении инертный газ : галоген = 50 : 1. Для смеси Kr–Br₂ максимальная

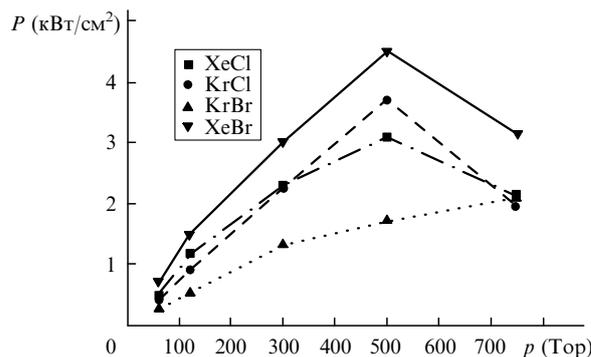


Рис.2. Зависимости импульсной плотности мощности излучения молекул KrCl*, XeCl*, XeBr* и KrBr* от давления рабочей смеси состава Xe : Cl₂ = 50 : 1, Kr : Cl₂ = 50 : 1, Xe : Br₂ = 50 : 1 и Kr : Br₂ = 100 : 1.

плотность мощности достигалась при давлении 750 Тор и соотношении Kr : Br₂ = 100 : 1. На рис.2 показаны зависимости импульсной плотности мощности излучения молекул KrCl*, XeCl*, XeBr* и KrBr* от давления рабочей смеси. Максимальные импульсные плотности мощности излучения молекул KrCl*, XeCl*, XeBr* и KrBr* составили 3.7, 3.1, 4.5 и 2.1 кВт/см² при эффективностях 5%, 4.8%, 5.5% и 4% соответственно. В этих условия вложенная в плазму разряда энергии была равна 1 Дж.

Напряжение на разрядном промежутке, ток разряда и временной ход импульса излучения молекулы XeBr* при давлении 500 Тор показаны на рис.3. Импульс тока регистрировался на фронте импульса напряжения и немного запаздывал (менее чем на 1 нс) относительно импульса

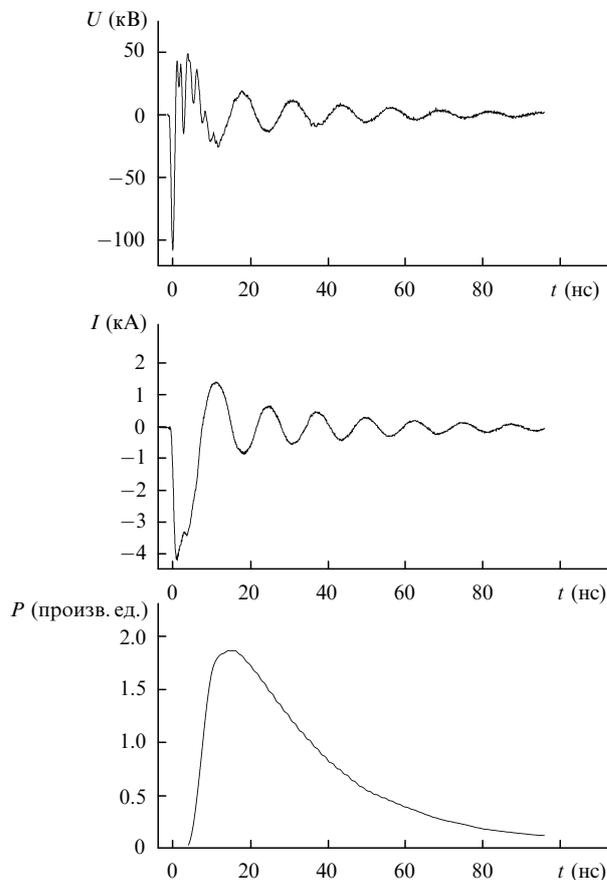


Рис.3. Типичные осциллограммы импульса напряжения, тока разряда и импульса излучения объемного разряда в смеси Xe : Br₂ = 50 : 1 при рабочем давлении 500 Тор.

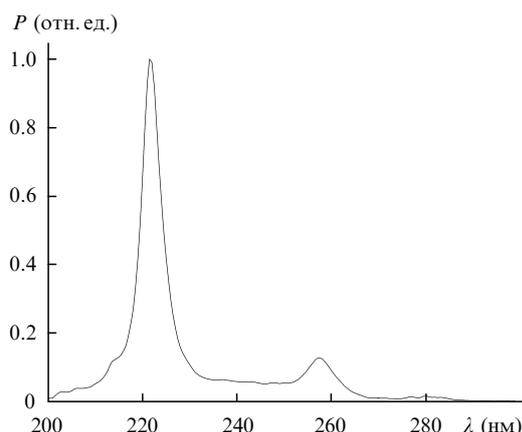


Рис.4. Спектр излучения молекул KrCl^* в объемном разряде при давлении 500 Тор.

напряжения. При этом на импульсе напряжения отсутствовал предпробойный пик, амплитуда которого обычно превышает уровень напряжения в квазистационарной стадии объемного разряда, что реализуется в условиях интенсивной предыонизации. Аналогичные осциллограммы были получены в [13], где данный режим разряда было предложено называть объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ).

Длительности импульсов излучения плазмы объемных разрядов в галогенидах инертных газов, полученные в оптимальных с точки зрения светового выхода условиях, составляли 30–40 нс на полувысоте амплитуды.

Спектры излучения свечения плазмы объемных наносекундных разрядов в смесях $\text{Kr}-\text{Cl}$, $\text{Xe}-\text{Cl}$, $\text{Xe}-\text{Br}$ состояли из узких (несколько нанометров на полувысоте) интенсивных полос $\text{B}-\text{X}$ -переходов и слабоинтенсивных полос $\text{D}-\text{A}$ - и $\text{C}-\text{A}$ - переходов соответствующих эксиплексных молекул. С увеличением давления рабочей смеси доля энергии, излучаемой в полосах $\text{D}-\text{A}$ - и $\text{C}-\text{A}$ - переходов, уменьшалась, и при давлении 500 Тор в полосах $\text{B}-\text{X}$ было сосредоточено до 90 % энергии всего излучения. На рис.4 показан спектр излучения молекулы KrCl^* . Спектр излучения свечения разряда в смеси $\text{Kr}-\text{Br}$ состоял из полос $\text{B}-\text{X}$ -переходов молекул KrBr^* (206 нм) и Br_2^* (289 нм), а также полос $\text{C}-\text{A}$ - и $\text{B}-\text{A}$ -переходов молекулы KrBr^* (222 и 228 нм соответственно). Причем соотношения интенсивностей полос переходов молекул KrBr^* и Br_2^* изменялись в зависимости от содержания Br_2 в рабочей смеси: чем больше была доля Br_2 , тем менее интенсивными становились полосы $\text{B}-\text{X}$ -, $\text{C}-\text{A}$ - и $\text{B}-\text{A}$ -переходов молекулы KrBr^* .

Для увеличения ресурса работы источников импульсного излучения молекул KrCl^* , XeCl^* , XeBr^* и KrBr^* в состав рабочих смесей добавлялись неон и аргон. Показано, что добавление Ne (10 Тор) к смесям $\text{Kr}-\text{Cl}_2$ и $\text{Xe}-\text{Cl}_2$ приводило к увеличению ресурса работы (число импульсов излучения до снижения амплитуды выхода на 50 %) в 5.4 и 4.5 раза соответственно. Так, например, за 250 импульсов плотность мощности излучения моле-

кулы KrCl^* снизилась на 24 %, а при добавлении неона – только на 4 %. Добавление Ar (15 Тор) к смесям $\text{Kr}-\text{Br}_2$ и $\text{Xe}-\text{Br}_2$ увеличивало ресурс работы в 2 и 1.5 раза соответственно. При этом спектры излучения исследованных смесей не изменялись.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе показана возможность получения объемных импульсных разрядов в галогенидах инертных газов без источника предыонизации. Данный режим был использован для получения высокой плотности излучения. Для смесей $\text{Kr}-\text{Cl}_2$, $\text{Xe}-\text{Cl}_2$, $\text{Xe}-\text{Br}_2$ оптимальные рабочие давления составляли 500 Тор при соотношении инертный газ : галоген = 50 : 1. Для смеси $\text{Kr}-\text{Br}_2$ рабочее давление было равно 750 Тор при отношении $\text{Kr} : \text{Br}_2 = 100 : 1$. Максимальные импульсные плотности мощности излучения молекул KrCl^* , XeCl^* , XeBr^* и KrBr^* составили 3.7, 3.1, 4.5 и 2.1 кВт/см² при эффективностях 5 %, 4.8 %, 5.5 % и 4 % соответственно. Длительности импульсов излучения на полувысоте, полученные в оптимальных условиях, были равны 30–40 нс. Спектры излучения плазмы объемных разрядов в $\text{Kr}-\text{Cl}$, $\text{Xe}-\text{Cl}$ и $\text{Xe}-\text{Br}$ состоят из интенсивных полос $\text{B}-\text{X}$ -переходов соответствующих молекул (шириной несколько нанометров). Показано, что добавление неона и аргона к рабочим смесям увеличивает ресурс работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 2706) и гранта Президента Российской Федерации (МК-2489.2005.8).

1. Скакун В.С., Кривоносенко А.Н., Ломаев М.И., Соснин Э.А., Трасенко В.Ф. *Оптика атмосферы и океана*, **13**, 309 (2000).
2. Ерофеев М.В., Ломаев М.И., Соснин Э.А., Трасенко В.Ф., Шитц Д.В. *Оптический журнал*, **68**, 75 (2001).
3. Carman R.J., Mildren R.P., Ward B.K., Kane D.M. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 2399 (2004).
4. Mildren R.P., Carman R.J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**, 1 (2001).
5. Mildren R.P., Carman R.J., Falconer I.S. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **34**, 3378 (2001).
6. Kogelschatz U. *Pure & Appl. Chem.*, **62**, 1667 (1990).
7. Xu X. *Thin Solid Films*, **390**, 237 (2001).
8. Лисенко А.А., Ломаев М.И. *Оптика атмосферы и океана*, **15**, 293 (2002).
9. Авдеев С.М., Соснин Э.А., Костыря И.Д., Трасенко В.Ф. *ЖТФ*, **76**, 59 (2006).
10. Erofeev M.V., Tarasenko V.F. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 3609 (2006).
11. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. *ПТЭ*, **203**, 203 (1977).
12. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. *Изв. вузов. Сер. радиофизика*, **25**, 1131 (1982).
13. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Трасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34**, 1007 (2004).
14. Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Трасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **36**, 576 (2006).
15. Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В., Трасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **37**, 595 (2007).
16. Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. *ПТЭ*, **146** (1989).