

# Излучение в аргоне и криптона на длине волны 147 нм при возбуждении диффузным разрядом, инициируемым убегающими электронами\*

Г.Н.Герасимов, Б.Е.Крылов, М.И.Ломаев, Д.В.Рыбка, В.Ф.Тарасенко

*В аргоне, криптона и ксенона исследовано излучение плазмы импульсного диффузного разряда, формируемого при повышенных давлениях за счет предыонизации промежутка убегающими электронами. На разрядный промежуток подавались наносекундные импульсы напряжения с амплитудой  $\sim 220$  кВ. Показано, что при наличии в аргоне и криптона примеси ксенона ( $\sim 0.01\%$ ) возникает мощное узкополосное излучение на длине волны 147 нм. Предполагается, что это излучение принадлежит полосам гетероядерных молекул  $Xe^*Ar$  и  $Xe^*Kr$ .*

**Ключевые слова:** вакуумное ультрафиолетовое излучение, димеры, импульсный объемный разряд, убегающие электроны.

## 1. Введение

Оптические свойства газоразрядной плазмы смесей инертных газов обсуждались во многих публикациях [1–7]. Наиболее интересные результаты получены при исследовании плазмы инертных газов с небольшой добавкой более тяжелого инертного газа. В частности, в газоразрядной плазме криптона с малой примесью ксенона (менее 0.1 %) обнаружено интенсивное узкополосное вакуумное ультрафиолетовое (ВУФ) излучение в области  $\lambda = 147$  нм, доминирующее в ВУФ спектре исследуемой смеси. Доказано, что это излучение может быть идентифицировано как электронно-колебательный спектроскопический переход между слабосвязанными возбужденными ( $1, 0^+$ ) и основным ( $0_g^+$ ) состояниями гетероядерной молекулы  $Xe^*Kr$ . Экспериментально показано, что исследуемая плазма представляет собой усиливающую среду с высоким коэффициентом усиления, а узкополосное излучение является усиленным спонтанным излучением [8]. Однако в работах [4–8] исследования проводились в стационарных и квазистационарных режимах при возбуждении продольного разряда в капиллярах. Представляет интерес выполнить подобные исследования при повышенных давлениях инертных газов и импульсном возбуждении поперечным разрядом.

В последние годы внимание ряда исследователей было вновь обращено к изучению объемного (диффузного) разряда, формируемого за счет предыонизации газа в промежутке убегающими электронами [9–14]. В частности, в [10, 12] была получена сравнительно высокая интенсивность свечения димеров ксенона, криптона и аргона при возбуждении объемным разрядом, инициируемым пуч-

ком электронных лавин (ОРИПЭЛ). ОРИПЭЛ позволяет реализовать высокие удельные мощности возбуждения при повышенных давлениях различных газов и наносекундной длительности импульсы высокого напряжения. Например, в воздухе при атмосферном давлении удельная мощность возбуждения достигала  $800$  МВт/см<sup>3</sup> [9].

В настоящей работе исследованы особенности спектра излучения импульсного разряда в аргоне, криптона и ксенона при больших удельных мощностях энерговывода. В криптона и аргоне содержались малые примеси ксенона ( $\sim 0.01\%$ ). Использовалось импульсное возбуждение ОРИПЭЛ с удельной мощностью  $\sim 100$  МВт/см<sup>3</sup>.

## 2. Экспериментальная установка

Для исследования характеристик разряда и излучения применялась установка, которая была подробно описана в работе [9]. Конструкция газового диода показана на рис.1. Внутренний диаметр газовой камеры составлял 48 мм. Использовались плоский анод и катод с малым радиусом кривизны, что обеспечивало дополнительное усиление поля у катода. Катод был выполнен в виде трубки диаметром  $\sim 6$  мм из стальной фольги толщиной 100 мкм. Трубка закреплялась на металлическом стержне такого же диаметра. Плоский анод был изготовлен из латунной плас-

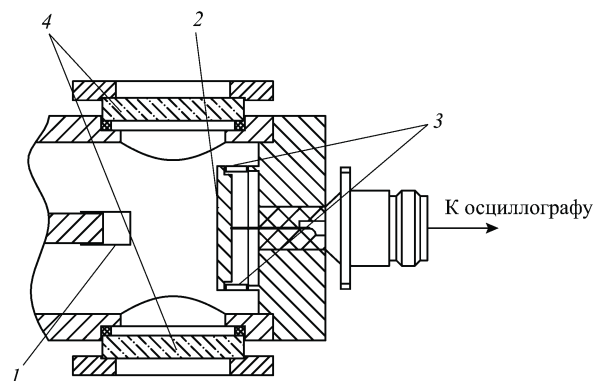


Рис.1. Конструкция разрядной камеры: 1 – катод; 2 – анод; 3 – сопротивления шунта; 4 – окна из  $CaF_2$ ; генератор РАДАН-220 подключался к разрядной камере слева.

\* Доложена на IX Международной конференции «Импульсные лазеры на переходах атомов и молекул» (AMPL-IX), Томск, Россия, 14–18 сентября 2009 г.

Г.Н.Герасимов, Б.Е.Крылов. ФГУП «НПК "ГОИ им. С.И.Вавилова"», Россия, 199034 С.-Петербург, Биржевая линия, 12  
М.И.Ломаев, Д.В.Рыбка, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: Lomaev@loi.hcei.tsc.ru

тинки и соединен с корпусом камеры через шунт. Расстояние между катодом и анодом варьировалось в пределах 10–16 мм. На разрядный промежуток подавались импульсы напряжения от генератора РАДАН-220. Генератор имел волновое сопротивление 20 Ом и формировал на разрядном промежутке импульс напряжения с амплитудой  $\sim 220$  кВ и длительностью на полувысоте при согласованной нагрузке  $\sim 2$  нс. Длительность фронта импульса напряжения составляла  $\sim 0.5$  нс.

Для регистрации сигналов с токового шунта применялся осциллограф TDS-3034 с полосой 0.3 ГГц (частота дискретизации 2.5 Гс/с). Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом. Спектры излучения регистрировались вакуумным монохроматором VM-502 (Acton Researcher Corp.) со спектральным шагом 1 нм при работе установки в импульсно-периодическом режиме. Для регистрации излучения оно выводилось через боковые окна из  $\text{CaF}_2$  (рис. 1). Спектральная чувствительность вакуумного монохроматора в диапазоне 120–250 нм оценивалась в относительных единицах с учетом дифракционной эффективности решетки и квантовой эффективности используемого люминофора. Временные характеристики излучения в отдельных спектральных диапазонах определялись с помощью ФЭУ (EMI 9781 В) монохроматора, который позволял измерить передний фронт сигнала длительностью  $\sim 3$  нс и задний фронт длительностью  $\sim 30$  нс.

### 3. Результаты эксперимента

Во всех газах (аргоне, криптоне и ксеноне) при давлении 0.3–1.2 атм и длине разрядного промежутка 16 мм без источника дополнительной предьонизации был получен объемный разряд (ОРИПЭЛ). Фотографии свечения

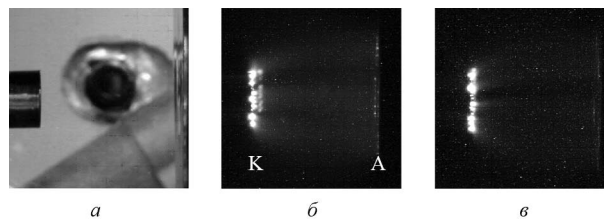


Рис.2. Фотографии межэлектродного промежутка (а) и интегрального свечения разряда, усредненного за три импульса, в аргоне (б) и криптоне (в) при давлении 1.2 атм (К – катод, А – анод).

разряда при давлении 1.2 атм показаны на рис.2. Разряд имел форму диффузного конуса или однородных диффузных струй, которые могли перекрываться. Яркие пятна видны только на катоде, и их размер не превышал 1 мм. Предьонизация промежутка в режиме ОРИПЭЛ обеспечивалась убегающими электронами [9, 14]. При уменьшении длины промежутка мог происходить переход от объемного разряда к искровому. Однако и при малых длинах промежутка объемная стадия разряда опережала искровую. Переход от объемного разряда к искровому подробно описан в работе [14].

Результаты спектральных исследований приведены на рис.3, 4 и 5 для аргона, криптона и ксенона соответственно. Как и в работе [10], при повышенных давлениях (в данных экспериментах 1.2 атм) основная часть энергии излучается димерами инертных газов. Наиболее интересный результат был получен при возбуждении аргона и криптона с малыми примесями ксенона ( $\sim 0.01\%$ ). При добавках ксенона было зарегистрировано интенсивное излучение на длине волны  $\lambda = 147$  нм (рис.3 и 4). Интенсивность этой полосы была наибольшей для аргона при давлении  $\sim 0.9$  атм и для криптона при давлении 0.3 атм. Временной ход интенсивности излучения в области  $\lambda = 147$  нм

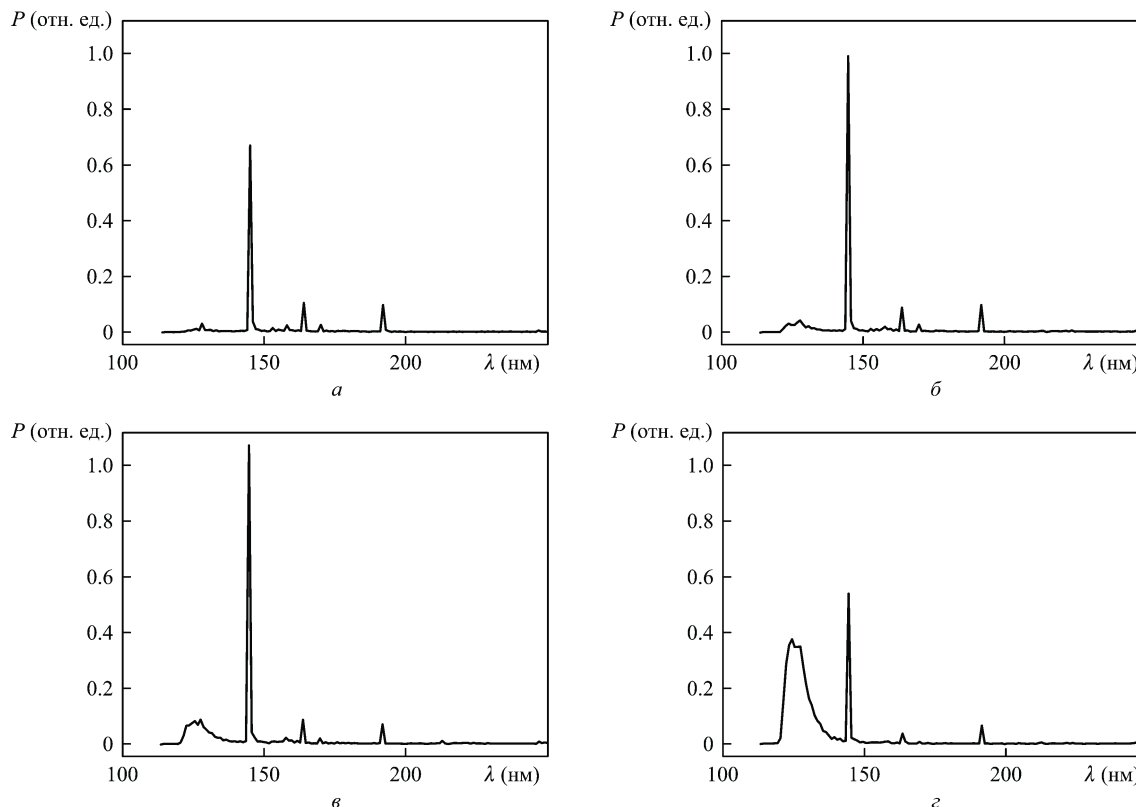


Рис.3. Спектр излучения в аргоне с примесью ксенона (0.01 %) при давлении 0.3 (а), 0.6 (б), 0.9 (в) и 1.2 атм (з).

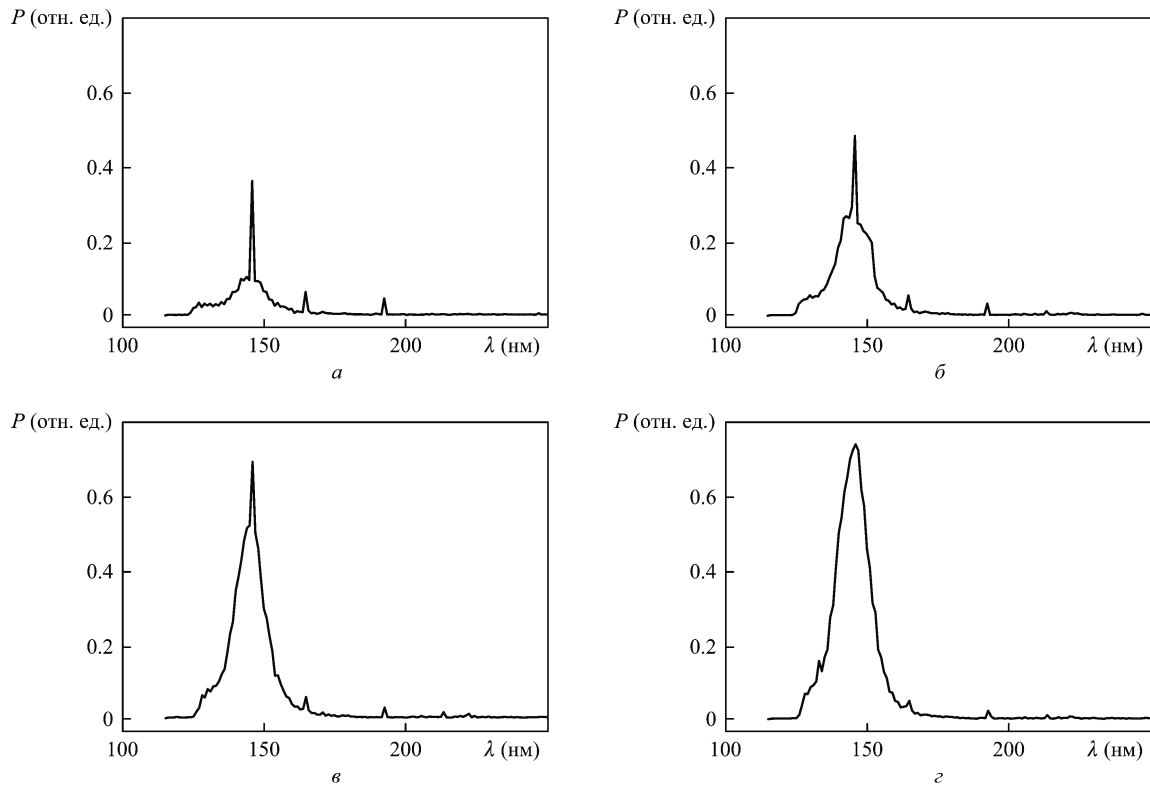


Рис.4. Спектр излучения в криптоне с примесью ксенона (0.01 %) при давлении 0.3 (а), 0.6 (б), 0.9 (в) и 1.2 атм (г).

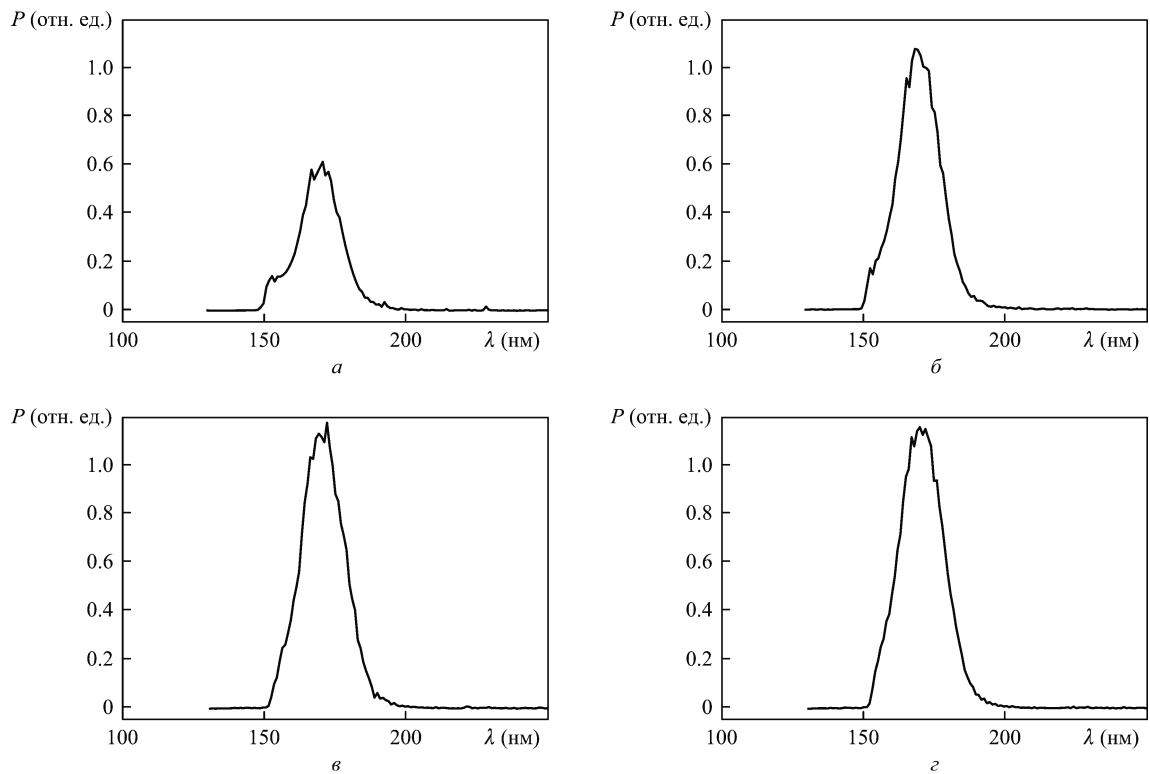


Рис.5. Спектр излучения ксенона при давлении 0.3 (а), 0.6 (б), 0.9 (в) и 1.2 атм (г).

примерно соответствовал временному ходу интенсивности излучения димеров аргона и криптона. На рис.6 приведены осциллограммы тока разряда и импульса излучения в криптоне с примесью ксенона ( $\sim 0.01\%$ ), полученные с помощью ФЭУ. Длительность импульса излучения на полувысоте зависела от давления смеси. Мощность энерговода при давлении газов свыше 1 атм составляла  $\sim 100$  МВт/см<sup>3</sup>.

#### 4. Обсуждение полученных результатов

Рассмотрим спектры, полученные при возбуждении аргона, содержащего малые примеси ксенона. На рис.3 представлены спектры излучения разряда при различных давлениях. В спектрах зафиксированы: эмиссия гомоядерных димеров аргона (максимум излучения на  $\lambda = 126$  нм), узкополосное излучение на  $\lambda = 147$  нм, излучение приме-

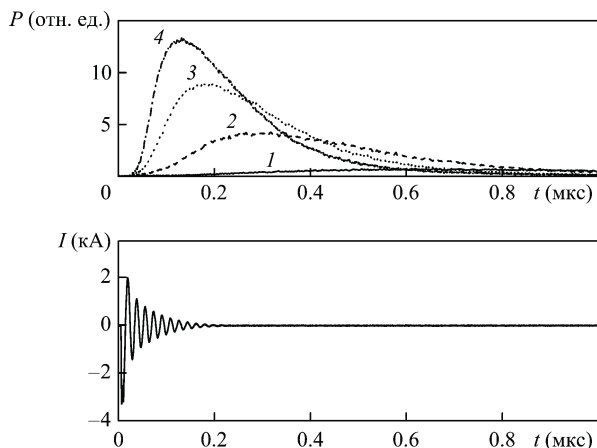
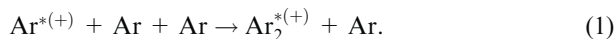


Рис.6. Осциллограммы импульса тока разряда  $I$  и импульсов излучения  $P$  в области  $\lambda \sim 147$  нм при давлении криптона с примесью 0.01 % ксенона 0.3 (1), 0.6 (2), 0.9 (3) и 1.2 атм (4).

си углерода на  $\lambda = 165.7$  и 193 нм. В соответствии с [15] узкополосное излучение – это излучение гетероядерного димера  $\text{Xe}^*\text{Ar}$ . Интенсивность широкополосного излучения гомоядерной молекулы (димера)  $\text{Ar}_2^*$  медленно увеличивается с ростом давления от 0.3 до 0.9 атм. Указанное поведение интенсивности не соответствует тому факту, что основным механизмом образования димеров аргона в послесвечении является процесс трехчастичной конверсии, скорость которого пропорциональна квадрату давления аргона. Это означает, что «ожидаемое» относительное увеличение интенсивности при росте давления в указанном диапазоне должно быть равно девяти. Дальнейший рост давления аргона от 0.9 до 1.2 атм приводит к увеличению интенсивности широкополосного излучения димера более чем в четыре раза. Этот также необъяснимый, на первый взгляд, факт может быть интерпретирован на основе анализа основных процессов, происходящих в послесвечении исследуемого разряда, поскольку более 90 % регистрируемой световой энергии излучается после обрыва импульса тока разряда.

В активной фазе разряда основная часть энергии, аккумулируемая газом, идет на ионизацию и возбуждение атомарного аргона. На первых стадиях послесвечения происходит конверсия возбужденных и ионизованных атомов аргона в двухатомные молекулярные ионы и возбужденные димеры аргона:



На последующих стадиях послесвечения происходят активная рекомбинация молекулярных ионов аргона и радиационный распад димеров аргона. При рекомбинации в результате цепочки релаксационных процессов в конечном счете формируются возбужденные димеры. Как следует из [16, 17], в плазме послесвечения смеси газов образуются гетероядерные димеры  $\text{Xe}^*\text{Ar}$ , интенсивное узкополосное излучение которых с высокой вероятностью стимулирует узкополосное вынужденное излучение гомоядерного димера  $\text{Ar}_2^*$  на  $\lambda = 147$  нм.

Предлагаемая схема процессов объясняет наблюдаемые экспериментальные закономерности. В частности, медленный рост интенсивности широкополосного излучения димеров аргона при увеличении давления от 0.3 до 0.9 атм можно объяснить их активным распадом за

счет процесса стимулированного излучения узкополосного ВУФ излучения. При этом, естественно, должна возрастать интенсивность узкополосного излучения. Однако для его регистрации необходим специальный эксперимент в связи с сильным поглощением узкополосного излучения в холодном слое между плазменным промежуток и выходным окном. Тем не менее даже в условиях, когда толщина этого слоя достигает 2 см, интенсивность узкополосного излучения увеличивалась с ростом давления от 0.3 до 0.9 атм. Можно полагать, что при модернизации установки, когда толщина холодного слоя будет минимизирована, интенсивность узкополосного ВУФ излучения значительно увеличится.

Следуя предложенной концепции, можно полагать, что увеличение давления от 0.9 до 1.2 атм приводит к тому, что за счет роста концентрации гетероядерных димеров  $\text{XeAr}$  в основном состоянии вероятность поглощения узкополосного излучения в плазменном объеме начинает конкурировать с вероятностью появления фотонов стимулированного излучения. При этом вероятность радиационного распада димера аргона за счет уменьшения вероятности узкополосного стимулированного излучения будет возрастать. Предложенная схема процессов объясняет на качественном уровне наблюдаемые экспериментальные закономерности, а результаты исследования плазмы криптона и аргона с малой примесью ксенона уже в представленном виде отчетливо указывают на вклад стимулированного излучения в узкополосное ВУФ излучение в области  $\lambda = 147$  нм. Подобное объяснение наблюдаемых экспериментальных закономерностей можно использовать и для случая смеси криптона с ксеноном (рис.4).

Результаты эксперимента с ксеноном показывают, что принятые выше предположения о механизме основных процессов, протекающих в послесвечении исследуемого разряда, оправданны. Действительно, интенсивность широкополосного излучения ксенона в послесвечении разряда растет с давлением, хотя темп роста не соответствует ее квадратичной зависимости от давления. Одной из причин такого поведения интенсивности может быть рост поглощения в коротковолновом крыле спектра излучения. Другой причиной может являться «перегрев» газа, возникающий с ростом давления, о чем свидетельствует увеличение ширины непрерывного спектра на его полувысоте при увеличении давления. Кроме того, при увеличении давления ксенона амплитуда тока разряда уменьшается. Анализ кинетики интенсивности непрерывного излучения в ксеноне также подтверждает представления о том, что основными процессами в послесвечении разряда в ксеноне являются трехчастичная конверсия возбужденных и ионизованных атомов в двухатомные молекулы и молекулярные ионы, а также диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов. Константа скорости конверсии, оцененная по нарастающей части временной зависимости интенсивности послесвечения димера ксенона, составляет  $\sim 5 \times 10^{-32}$  см<sup>6</sup>/с, что хорошо соответствует значениям, известным для ксенона из литературы [18].

## 5. Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что при возбуждении ОРИПЭЛ в аргоне и криптона с малыми примесями ксенона кроме мощного излучения димеров инертных газов регистрируется узкополосное излучение на  $\lambda = 147$  нм. Анализ спектров излучения импуль-

сного разряда в аргоне и криптоне, содержащих  $\sim 0.01$  % ксенона, свидетельствует о существовании в нем узкополосного стимулированного ВУФ излучения. Предполагается, что в данных условиях при увеличении активной длины и помещении системы в резонатор может быть получено лазерное излучение в ВУФ области спектра на  $\lambda = 147$  нм.

Отметим также, что используемое импульсное возбуждение ОРИПЭЛ с уникальными параметрами, обеспечивающими, по нашим оценкам, концентрации возбужденных димеров основного газа  $\sim 10^{16}$  см $^{-3}$  и выше, дает надежду на получение при увеличении давления, активной длины и использовании резонатора лазерной генерации и в широкой полосе излучения гомоядерных димеров. Подобная возможность при возбуждении ОРИПЭЛ обсуждалась ранее в работах [9, 11, 19].

Работа была поддержана РФФИ (грант № 09-02-00614-а) и интеграционным проектом СО РАН–УрО РАН «Сильноточные разряды в газах и разработка электрофизических устройств на их основе».

1. Salameo Y., Birot A., Brunet H., Dijols H., Galy J., Millet P., Montagne J.P. *J. Chem. Phys.*, **74** (8), 288 (1981).
2. Cheshnovsky O., Raz B., Jortner J. *J. Chem. Phys.*, **59** (8), 3301 (1973).
3. Крюков Н.А., Чаплыгин М.А. *Оптика и спектроскопия*, **82** (4), 552 (1997).
4. Gerasimov G., Hallin R., Krylov B., Volkova G., Heijkenskjold F., Morozov A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3402**, 322 (1997).
5. Герасимов Г.Н., Халлин Р., Крылов Б.Е. *Труды ГОИ*, **84** (218), 55 (2000).
6. Krylov B., Gerasimov G., Morozov A., Hallin R., Arnesen A., Heijkenskjold F. *Eur. Phys. J.*, **8**, 227 (2000).
7. Герасимов Г.Н., Халлин Р., Крылов Б.Е. *Оптика и спектроскопия*, **88** (2), 176 (2000).
8. Герасимов Г.Н., Халлин Р., Крылов Б.Е., Арнесен А. *Оптический журн.*, **74** (9), 3 (2007).
9. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скаун В.С., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34** (11), 1007 (2004).
10. Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **36** (6), 576 (2006).
11. Бойченко А.М., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **36** (12), 1176 (2006).
12. Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х. *Квантовая электроника*, **37** (6), 595 (2007).
13. Репин П.Б., Репьев А.Г. *ЖТФ*, **78** (1), 78 (2008).
14. Baksh E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V., Shulepov M.A., Tarasenko V.F. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 185201 (2009).
15. Герасимов Г.Н. *УФН*, **174** (2), 155 (2004).
16. Герасимов Г.Н., Крылов Б.Е., Hallin R., Morozov A., Arnesen A., Heijkenskjold F. *Оптика и спектроскопия*, **92** (2), 475 (2002).
17. Gerasimov G. *Spectroscopy Lett.*, **34** (2), 191 (2001).
18. Герасимов Г.Н., Крылов Б.Е., Логинов А.В., Щукин С.А. *УФН*, **162** (5), 123 (1992).
19. Зверева Г.Н., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. *Оптика и спектроскопия*, **102** (1), 46 (2007).