

03;04;07;10;12

## Излучение димеров ксенона, криптона и аргона в послесвечении объемного наносекундного разряда при повышенных давлениях

© Е.Х. Бакшт, М.И. Ломаев, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск  
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступило в Редакцию 24 апреля 2006 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований излучательных характеристик плазмы объемного разряда, инициируемого пучком электронных лавин, в тяжелых инертных газах при давлениях до 1.5 atm. Показано, что более 90% энергии излучения в области от 120 до 850 nm излучается димерами ксенона, криптона и аргона. При возбуждении ксенона с объема  $\sim 1 \text{ cm}^3$  получена мощность излучения  $\sim 300 \text{ kW}$  и энергия  $\sim 45 \text{ mJ}$ .

PACS: 52.80.Yr

1. Источники спонтанного излучения в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) и ультрафиолетовой (УФ) областях спектра востребованы в ряде современных технологий и широко исследуются в настоящее время. Большое внимание уделяется источникам спонтанного излучения на основе неравновесного излучения эксимерных (эксиплексных) молекул — эксилампам, возбуждение которых осуществляется самостоятельным электрическим разрядом. Чаше других при этом используются возбуждение барьерным разрядом с частотами повторения импульсов десятки–сотни kHz [1,2]. Однако импульсная мощность излучения с единицы излучающей поверхности эксиламп барьерного разряда оказывается сравнительно низкой. Увеличить импульсную мощность излучения в ВУФ- или УФ-областях спектра можно за счет увеличения мощности возбуждения и давления рабочей смеси. Для этого применяют импульсные разряды, объемный характер которых обеспечивается за счет предыонизации разрядного промежутка [3,4].

Однако и в таких разрядах плотность мощности излучения обычно не превышает  $10 \text{ kW/cm}^2$ .

Весьма перспективными с точки зрения получения большой импульсной мощности излучения в ВУФ-диапазоне спектра могут оказаться объемные разряды, инициируемые пучком электронных лавин (ОРИПЭЛ) [5–7]. Данные разряды формируются в неоднородном электрическом поле без применения дополнительного источника пре-дьюонизации и позволяют получать удельные мощности возбуждения в сотни мегаватт при давлении  $1 \text{ atm}$  и выше. Однако спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения плазмы данных разрядов исследовались лишь в видимой и УФ-области спектра. Причем в этих спектральных диапазонах удельные мощности излучения в азоте, воздухе и инертных газах были малы [8,9]. С другой стороны, при возбуждении инертных газов следует ожидать образования их димеров и соответственно интенсивного излучения в ВУФ-области спектра на переходах димеров инертных газов в нижнее „разлетное“ состояние.

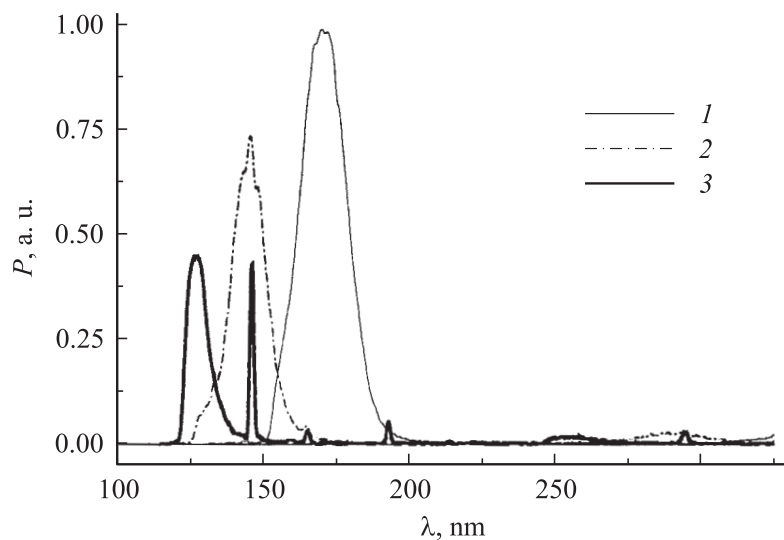
Цель настоящей работы — экспериментально исследовать излучательные характеристики ксенона, криптона и аргона в ВУФ- и УФ-областях спектра при возбуждении ОРИПЭЛ в условиях, при которых реализуются удельные мощности возбуждения  $\sim 100 \text{ MW/cm}^3$ .

2. Возбуждение газа осуществлялось в камере, конструкция которой была подобной описанной в [9]. Расстояние между плоским анодом и катодом с малым радиусом кривизны варьировалось от 4 до 16 mm. В качестве источника импульсного напряжения использовался генератор РАДАН-220, формировавший импульсы напряжения с амплитудой  $\sim 220 \text{ kV}$ , длительностью импульса на полувывоте  $\sim 2 \text{ ns}$  и временем нарастания  $\sim 0.5 \text{ ns}$  [10]. Регистрация тока разряда осуществлялась с помощью токового шунта, установленного между анодом и корпусом разрядной камеры. Спектры излучения регистрировались с помощью спектрометра EPP2000C-25 (StellarNet-Inc.) с известной спектральной чувствительностью в области от 200 до 850 nm и в области от 120 до 540 nm с помощью вакуумного монохроматора VM-502 (Acton Researcher Corp.). При построении спектров в области от 120 до 850 nm исходные данные, полученные на спектрометре и монохроматоре, „сшивались“ на спектральном участке вблизи 200 nm. Для регистрации временного хода импульса излучения использовался как фотоэлектронный умножитель ФЭУ (ЕМ1 9781 В), установленный на монохроматоре,

так и коаксиальный фотоэлемент с медным или алюминиевым катодом, созданный на базе серийного прибора ФЭК-22. Излучение из плазмы разряда подавалось на фотокатод коаксиального фотоэлемента через пластинку из  $\text{CaF}_2$ . Временное разрешение данных фотоприемников составляло  $\sim 30$  и  $\sim 1$  ns соответственно для ФЭУ и фотоэлемента коаксиального. Для регистрации электрических импульсов применялся осциллограф TDS-3054 с полосой пропускания 0.5 GHz (5 Gs/s). Измерения энергии излучения проводились калиброванным фотоприемником ORHIR OPTRONICS INC. с фотоприемной головкой PE50BB.

3. В ксеноне, криптоне и аргоне без источника дополнительной предыонизации был получен объемный разряд, в том числе при давлении 1.5 atm. В соответствии с направлением линий напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке объемный разряд формировался в виде конуса или однородных струй. На электродах, прежде всего на катоде, были видны яркие пятна, размер которых не превышал 1 mm. При давлении ксенона и криптона более 1 atm на осциллограмме тока разряда отсутствовал выброс тока противоположной полярности, что свидетельствует об эффективной передаче энергии от генератора к плазме разряда. Оценки энергии, вкладываемой в плазму разряда в ксеноне при давлении 1.2 atm, дали ее величину  $\sim 1$  J. Отметим, что при возбуждении разрядом с предварительной ионизацией от искровых разрядов объемный разряд в ксеноне начинал контрагироваться при давлениях выше 0.2 atm [3].

Спектры излучения, полученные в ОРИПЭЛ, приведены на рис. 1. Во всех инертных газах в условиях больших удельных энерговкладов было зарегистрировано мощное широкополосное излучение димеров инертных газов в ВУФ-области спектра. Спектральная полуширина полос для ксенона, криптона и аргона при давлении 1.2 atm составляет соответственно  $\sim 18$ ,  $\sim 13$  и  $\sim 8$  nm. Мощности излучения в УФ и видимой области спектра имели на два порядка меньшую интенсивность, что соответствовало результатам работы [9]. Энергия излучения В–Х переходов димеров ксенона, криптона и аргона составляла не менее 90% от всей энергии излучения в диапазоне от 120 до 850 nm. Наибольшая интенсивность широкополосного излучения димеров наблюдалась в ксеноне. В криптоне и аргоне интенсивность излучения димеров была соответственно в  $\sim 1.5$  и  $\sim 2$  раза меньше. При возбуждении ксенона с объема  $\sim 1$  cm<sup>3</sup> получена мощность излучения  $\sim 300$  kW и энергия  $\sim 45$  mJ. Данные характеристики более чем



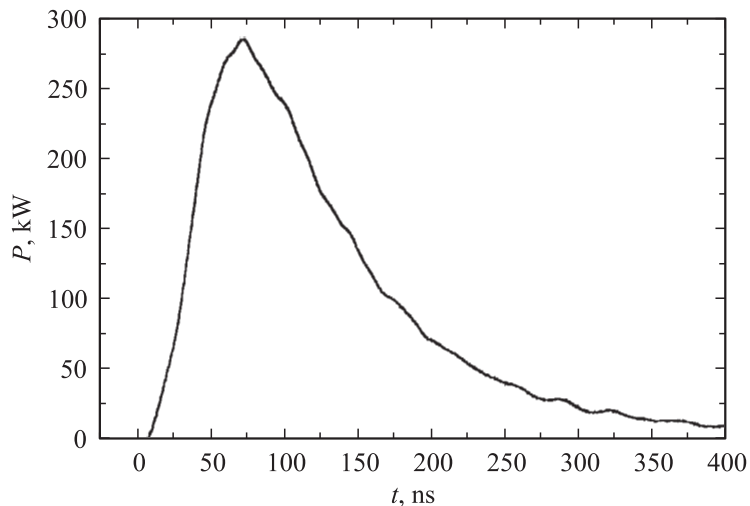
**Рис. 1.** Спектры излучения плазмы разряда в Xe (1), Kr (2) и Ar (3) при давлении 1.2 atm.

на порядок превышают полученные в [3] при возбуждении разрядом с УФ-предыонизацией.

Временной ход мощности излучения в ксеноне в ВУФ-области спектра при регистрации коаксиальным фотоэлементом с медным катодом приведен на рис. 2. При давлении ксенона 1.2 и 0.3 atm длительность импульса на полувысоте составила соответственно  $\sim 110$  и  $\sim 400$  ns.

При контрагировании разряда, что могло наблюдаться при уменьшении давления и межэлектродного зазора, спектр излучения существенно изменялся. Излучение контрагированного разряда, который уже нельзя относить к ОРИПЭЛ, было подобно излучению импульсных ламп, заполненных инертными газами, в частности ксеноном. При этом доминировало линейчатое и непрерывное излучение в УФ и видимой области спектра [11].

4. Таким образом, проведенные исследования показали, что при возбуждении ОРИПЭЛ инертных газов основная (более 90%) доля энергии в области 120–850 nm излучается на переходах димеров инертных



**Рис. 2.** Временной ход импульса излучения в ВУФ-области спектра в Хе при давлении 1.2 atm.

газов. Объемный характер разряда в неоднородном электрическом поле обеспечивается за счет „убегания“ электронов, механизм этого явления описан в работах [5–7,9].

Полученные результаты указывают на перспективность использования ОРИПЭЛ для создания короткоимпульсных источников мощного спонтанного излучения в ВУФ-области спектра. Полученные значения энергии излучения и мощности при возбуждении димеров инертных газов не являются предельными для данной установки и могут быть увеличены при модернизации установки и увеличении рабочего давления. Причем при увеличении давления рабочего газа и оптимизации размеров промежутка можно будет реализовать оптимальные для КПД удельные мощности возбуждения. Напомним, что удельные мощности возбуждения в этих условиях при давлении выше 1 atm составляли  $\sim 100 \text{ MW/cm}^3$ . Применение ОРИПЭЛ перспективно также с точки зрения создания электроразрядных лазеров на димерах инертных газов, для которых порог генерации может быть достигнут в послесвечении [12].

Данная работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 2706) и РФФИ (проект № 05-08-33621-а).

## Список литературы

- [1] *Kogelschatz U.* // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2003. V. 23. N 1. P. 1–45.
- [2] *Ломаев М.И., Скакун В.С., Соснин Э.А.* и др. // УФН. 2003. Т. 173. № 2. С. 201–217.
- [3] *Кузнецов А.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 5. С. 1–5.
- [4] *Панченко А.Н., Тарасенко В.Ф.* // Квантовая электроника. 2006. Т. 36. № 2. С. 169–173.
- [5] *Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2003. Т. 46. № 3. С. 94–95.
- [6] *Тарасенко В.Ф., Костыря И.Д.* // Изв. вузов. Физика. 2005. Т. 48. № 12. С. 40–51.
- [7] *Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I.* // Plasma Devices and Operations. 2005. V. 13. N 4. P. 231–279.
- [8] *Бабич Л.П., Лойко Т.В., Цукерман В.А.* // УФН. 1990. Т. 160. № 7. С. 49–82.
- [9] *Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф.* и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. В. 8. С. 35–40.
- [10] *Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г.* и др. // ПТЭ. 1989. № 2. С. 146–149.
- [11] *Рохлин Г.Н.* Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991. 720 с.
- [12] *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Справочные приложения, базы и банки данных. Том XI-4. Газовые и плазменные лазеры / Отв. ред. С.И. Яковленко.* М.: Физматлит, 2005. 820 с.