

Излучение в ВУФ-области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле

М.И. Ломаев, Д.А. Сорокин, В.Ф. Тарасенко*

*Институт сильноточной электроники СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3*

Поступила в редакцию 23.10.2011 г.

Исследовано излучение смесей аргона и гелия с малыми добавками ксенона в области 145–150 нм при возбуждении наносекундным диффузным разрядом, формируемым в неоднородном электрическом поле. Зарегистрирован временной ход импульсов излучения, а также оценены величины коэффициентов поглощения в ксеноне излучения из различных частей спектра излучения смесей He–Xe и Ar–Xe. Показано, что при содержании ксенона 0,1% и менее ширина полосы в области излучения резонансной линии ксенона уменьшается до ширины аппаратной функции монохроматора и ее максимум совпадает с максимумом резонансной линии ксенона (146,96 нм XeI, переход $5p^56s(^3P_1) \rightarrow 5p^6(^1S_0)$).

Ключевые слова: смеси аргона и гелия с ксеноном, гетероядерные молекулы, излучение резонансной линии, излучение на длине волны 147 нм, диффузный разряд; mixtures Ar–Xe and He–Xe, heteronuclear molecules, resonant line radiation, emission on wavelength of 147 nm, diffuse discharge.

Введение

В работах [1–4] было показано, что при газоразрядном возбуждении криптона с малыми добавками ксенона наблюдается увеличение интенсивности излучения в области резонансной линии ксенона с длиной волны 147 нм. Излучение в этой области было отнесено к электронно-колебательному переходу между слабосвязанными возбужденными $1, 0^+$ и основным 0_g^+ состояниями гетероядерной молекулы KrXe* [1–4]. При возбуждении смесей криптона с ксеноном ионным пучком также было зарегистрировано интенсивное излучение в области 147 нм, однако это излучение было отнесено к резонансной линии ксенона [5]. При возбуждении объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ [6]), для которого характерны высокие удельные мощности возбуждения (~ 100 МВт/см³ и более), также было зарегистрировано интенсивное излучение в области 147 нм [7].

В работе [8] экспериментально показано, что газоразрядная плазма представляет собой среду со сравнительно высоким коэффициентом усиления, а узкополосное излучение представляет собой усиленное спонтанное излучение. Генерация на переходе между возбужденными $1, 0^+$ и основным 0_g^+ состояниями гетероядерной молекулы KrXe* маловероятна из-за малой (~ 1100 см⁻¹ [9]) энергии диссоциации данной молекулы в возбужденном со-

стоянии, поэтому необходимы дальнейшие исследования характеристик излучения криптона и других инертных газов с добавками ксенона.

В настоящей статье рассмотрены спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения плазмы импульсного разряда в аргоне и гелии при малых добавках ксенона. Для возбуждения применялся ОРИПЭЛ с высокой удельной мощностью энерговода (~ 100 МВт/см³).

Отметим, что ранее при возбуждении капиллярным разрядом постоянного тока спектральные характеристики излучения в гелии, неоне, аргоне и криптона при малых добавках ксенона исследовались в [10]. Было обнаружено, что полоса с полушириной $\sim 0,1$ нм наблюдается в смесях ксенона со всеми вышеперечисленными газами и в этой полосе на длине волны 147 нм при добавках ксенона $\sim 1\%$ регистрируется провал.

Установки и методики

Для исследования характеристик разряда и излучения применялась установка, конструкция газового диода которой показана на рис. 1. Внутренний диаметр газовой камеры равнялся 48 мм. Использовались плоский анод (А) и катод (К) с малым радиусом кривизны, что обеспечивало дополнительное усиление поля у катода. Катод был выполнен в виде трубки диаметром ~ 6 мм из стальной фольги толщиной 100 мкм. Трубка закреплялась на металлическом стержне такого же диаметра. Плоский анод был выполнен из латунной пластинки и соединен с корпусом камеры через токовый шунт. Расстояние между катодом и анодом составляло 12 мм.

* Михаил Иванович Ломаев (Lomaev@loi.hcei.tsc.ru); Дмитрий Алексеевич Сорокин; Виктор Федотович Тарасенко.

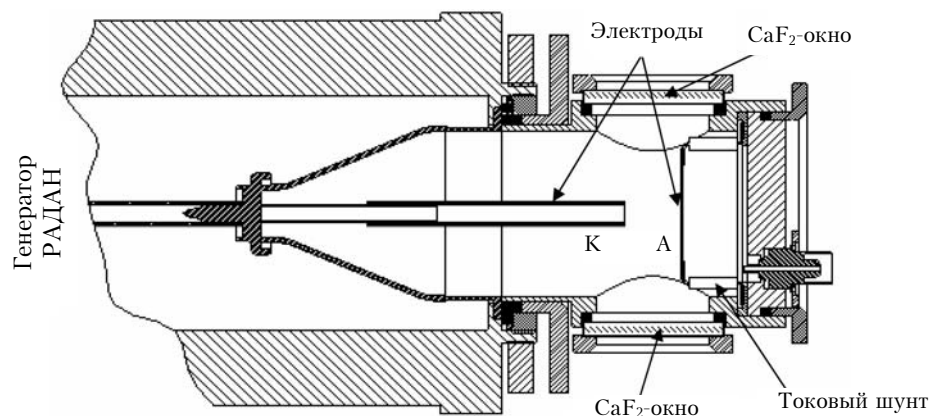


Рис. 1. Конструкция газодуговой камеры

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 ~220 кВ и длительностью на полувысоте при согласованной нагрузке ~2 нс. Фронт импульса напряжения составлял ~0,5 нс.

Система откачки и напуска газов включала в себя газовый пост с безмасляным пластинчатороторным насосом Dry Pump II (ILMVAC) и турбомолекулярным насосом Turbo-V 81-T (Agilent Technologies). Спектры излучения плазмы разряда, а также временной ход импульса излучения отдельных спектральных участков регистрировались с помощью вакуумного монохроматора VM-502 (Acton Research Corp.) и фотоэлектронного умножителя EM19781B. Спектральная полуширина аппаратной функции монохроматора при ширине входной и выходной щелей, равной нормальной (~30 мкм), составила ~0,3 нм.

Входная щель монохроматора с окном из фтористого лития и выходное окно разрядной камеры, изготовленное из фтористого кальция, соединялись герметичной промежуточной камерой, откачиваемой до остаточного давления ~10⁻⁶ торр. В экспериментах по измерению поглощения проходная камера заполнялась ксеноном при различном давлении. Толщина газового фильтра составляла 20 см. Регистрация электрических сигналов с емкостного делителя и ФЭУ осуществлялась при использовании цифрового осциллографа TDS3054B с полосой пропускания 500 МГц и частотой дискретизации 5 выборок за 1 нс.

Экспериментальные результаты

В проведенных экспериментах ОРИПЭЛ с наносекундной длительностью импульса формировался в ксеноне (Xe), а также в смесях аргон–ксенон (Ar–Xe) и гелий–ксенон (He–Xe). Давление смесей во всех экспериментах составляло 0,5 атм. Ксенон в данных смесях использовался в качестве добавки, и его концентрация изменялась от 0,005 до 10%. В проведенных опытах основное внимание было уделено исследованию спектров излучения

плазмы высоковольтного наносекундного разряда в смесях Ar–Xe и He–Xe в области длин волн 145–150 нм, в которой регистрируется излучение резонансной линии атома ксенона и гетероядерных димеров ArXe* и HeXe* при возбуждении данных смесей капиллярным разрядом [10].

На рис. 2 приведены спектры излучения в смесях Ar–Xe и He–Xe при различном содержании ксенона.

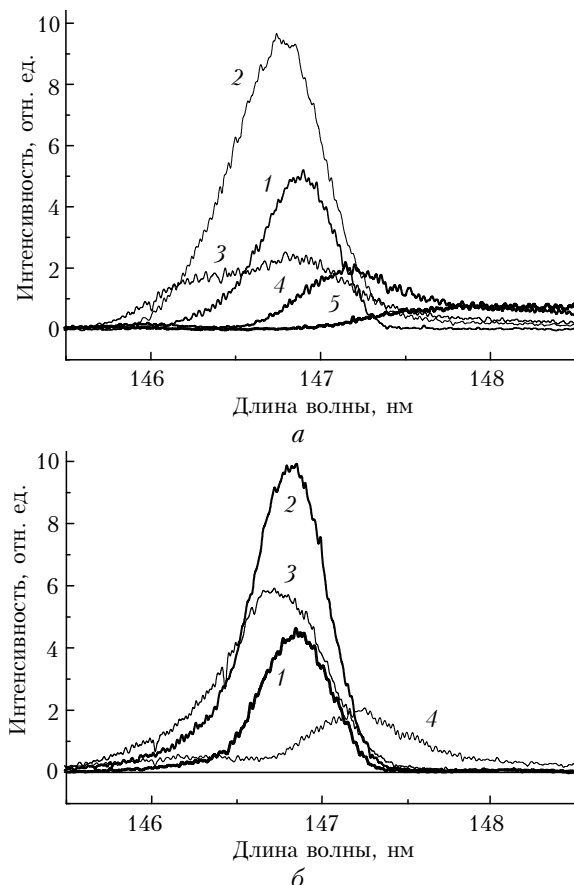


Рис. 2. Спектры излучения в смесях: а — Ar–Xe при содержании ксенона 0,015 (1), 0,05 (2), 0,1 (3), 0,3 (4) и 10% (5); б — He–Xe при содержании ксенона 0,005 (1), 0,01 (2), 0,1 (3) и 1% (4). Давление смесей 0,5 атм. Ширина щелей монохроматора 100 мкм

Видно, что изменение содержания ксенона заметно меняет интенсивность и спектральный состав излучения. Так, при содержании ксенона менее 0,1% регистрируется одна компонента. Ее пиковая длина волны примерно совпадает с длиной волны резонансной линии ксенона 146,96 нм. При содержании ксенона в смеси на уровне ~0,1 – 1% в спектре обеих смесей присутствуют как минимум две компоненты. При большем содержании ксенона в спектре доминирует излучение первого континуума димера ксенона.

Для смеси He–Xe был зарегистрирован временной ход импульсов излучения двух явно выраженных участков спектра (рис. 4), спектральный интервал между центрами которых составляет ~0,6 нм (спектральные участки А и Б на рис. 3).

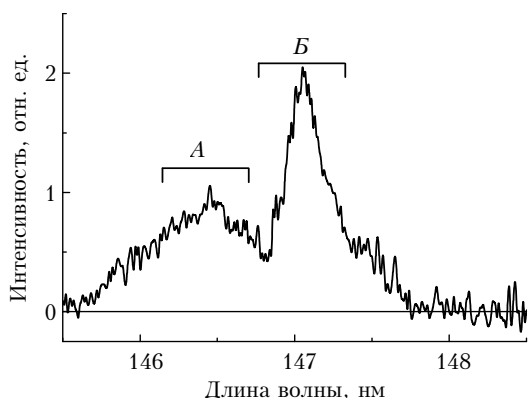


Рис. 3. Спектр излучения смеси He–Xe при содержании ксенона 1%. Давление смеси 0,5 атм. Ширина щелей монохроматора 30 мкм

Осциллограммы импульсов излучения представлены на рис. 4.

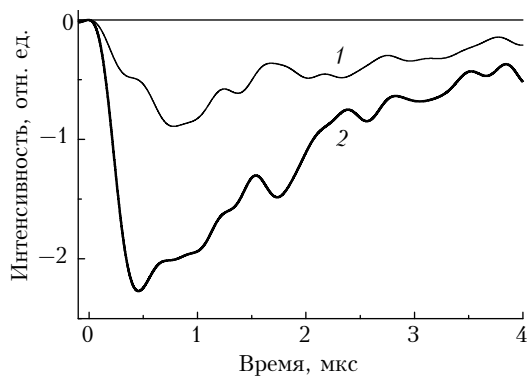


Рис. 4. Временной ход импульсов излучения в смеси He–Xe на длинах волн, соответствующих спектральному интервалу А (рис. 3), кривая 1, и интервалу Б (рис. 3), кривая 2

Видно, что интенсивность излучения в коротковолновой области достигает своего максимального значения на ~300 нс позже (кривая 1) по отношению к временному ходу излучения в длинноволновой области. Это, вероятно, является следствием того, что излучение на спектральных участках А и Б (рис. 3) соответствует излучению разных оптических переходов одной частицы (гетероядерного

димера HeXe*) или излучению разных возбужденных частиц.

Поскольку длинноволновая составляющая спектров излучения, приведенных на рис. 2 и 3, может предположительно относиться к излучению резонансной линии атома ксенона, то с целью выяснения корректности данного предположения был проведен эксперимент по влиянию давления ксенона в проходной камере на поглощение различных составляющих спектра излучения смеси Ag–Xe (общее давление смеси 0,5 атм, содержание ксенона ~0,1%). Результат эксперимента приведен на рис. 5.

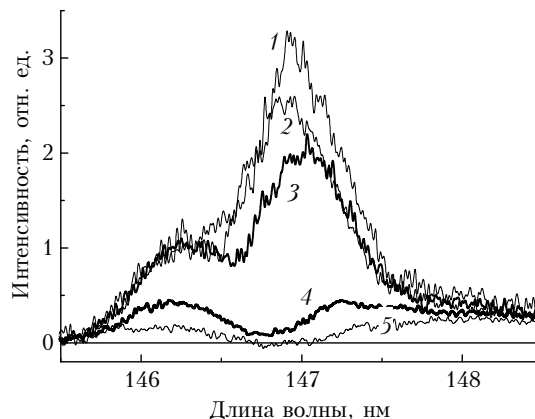


Рис. 5. Спектры излучения после прохождения газового фильтра при давлениях ксенона в проходной камере: 10^{-6} (1); 0,85 (2); 2,1 (3); 9 (4) и 18 торр (5). Давление Ag–Xe-смеси 0,5 атм при содержании ксенона 0,1%

Характерным является неравномерность поглощения излучения различных составляющих рассматриваемого спектрального интервала. Из рис. 5 видно, что, во-первых, длинноволновая составляющая спектра поглощается существенно больше и, во-вторых, максимальное поглощение наблюдается вблизи пика резонансной линии ксенона 146,96 нм, что вполне объяснимо, поскольку сечение поглощения в центре линии максимально. На рис. 6 приведены зависимости ослабления интенсивности излучения длинноволновой и коротковолновой составляющих спектра от давления ксенона в проходной камере.

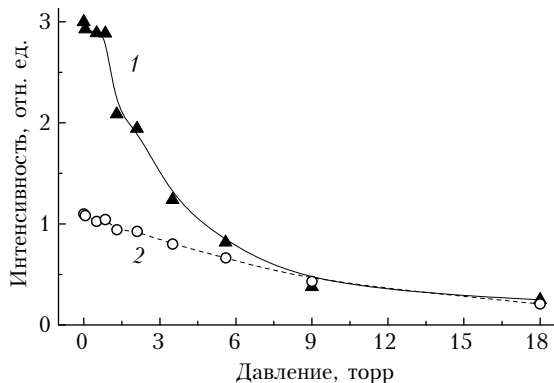


Рис. 6. Зависимость изменения интенсивности излучения длинноволновой (1) и коротковолновой составляющих (2) спектра от давления ксенона в проходной камере. Условия эксперимента соответствуют условиям рис. 5

При интерполяции обеих кривых спадающими экспонентами был оценен коэффициент поглощения длинноволновой и коротковолновой составляющих спектра. Его величина для длинноволновой части спектра при давлении ксенона в проходной камере 3,5 торр составила $\sim 3,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, а для коротковолновой части спектра оказалась примерно в 3 раза меньше.

С целью идентификации наблюдаемых спектров излучения и поглощения был зарегистрирован спектр излучения плазмы ОРИПЭЛ вблизи длины волны $\lambda \sim 147 \text{ нм}$ в диоде, заполненном ксеноном при давлении 1,5 торр. При этом проходная камера была вакуумирована. Спектральную линию, зафиксированную в данных условиях, вероятно, следует отнести к резонансной линии атома ксенона $\lambda = 146,96 \text{ нм}$. Ее спектральная полуширина ($\sim 0,3 \text{ нм}$) совпала с полушириной аппаратной функции монохроматора, а максимум линии примерно совпадает с максимумом длинноволновой части спектра излучения смесей Ar–Xe и He–Xe, что объясняет разный уровень поглощения коротко- и длинноволновой составляющих спектра.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что при возбуждении ОРИПЭЛ бинарных смесей аргона и гелия с малыми добавками ксенона в неоднородном электрическом поле при полном давлении 0,5 атм в спектре излучения газоразрядной плазмы в спектральном диапазоне от 145 до 150 нм наблюдается сложная структура излучения, зависящая от концентрации ксенона. При содержании ксенона менее 0,1% в спектре присутствует узкая полоса с пиковой длиной волны, приблизительно полностью совпадающей с длиной волны резонансной линии атома ксенона. При содержании ксенона $\sim 0,1 - 1\%$ в спектре излучения обеих смесей регистрируется структура, состоящая из 2 компонент.

Исследования временного хода импульсов излучения, а также поглощения излучения при прохождении газового фильтра, наполненного ксеноном, показали, что длинноволновая и коротковолновая компоненты, во-первых, достигают максимума интенсивности в разное время, а во-вторых, по-разному

поглощаются в ксеноне. Это служит основанием предполагать, что длинно- и коротковолновая компоненты излучаются разными частицами или на разных переходах одной частицы (гетероядерного димера ArXe^* (HeXe^*)).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 10-08-00556а.

1. Salamero Y., Birot A., Brunet H., Dijols H., Galy J., Millet P., Montagne J.P. Energy transfer kinetics of the VUV emissions for Kr–Xe mixtures // J. Chem. Phys. 1981. V. 74, N 8. P. 288–296.
2. Chesnovsky O., Raz B., Jortner J. Electronic energy transfer in rare gas mixtures // J. Chem. Phys. 1973. V. 59, N 8. P. 3301–3307.
3. Крюков Н.А., Чапльгин М.А. Исследование эксимеров, формирующихся в смеси ксенона и криптона в плазме газового разряда // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 82, № 4. С. 552–557.
4. Gerasimov G., Hallin R., Krylov B., Volkova G., Heijenskjold F., Morozov A. Amplification of $\sim 147 \text{ nm}$ radiation from discharge in the heavy inert gases // Proc. SPIE. 1998. V. 3403. P. 322–327.
5. Efthimiopoulos T., Zouridis D., Ulrich A. Excimer emission spectra of rare gas mixtures using either a supersonic expansion or a heavy-ion-beam excitation // J. Phys. D. 1997. V. 30, N 12. P. 1746–1754.
6. Тарасенко В.Ф., Бакут Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В. Диффузные разряды в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях, инициируемые убегающими электронами // Ж. техн. физ. 2010. Т. 80, вып. 2. С. 51–59.
7. Герасимов Г.Н., Крылов Б.Е., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. Излучение в аргоне и криптоне на длине волны 147 нм при возбуждении диффузным разрядом, инициируемым убегающими электронами // Квант. электрон. 2010. Т. 40, № 3. С. 241–245.
8. Герасимов Г.Н., Халин Р., Крылов Б.Е., Арнесен А. Механизм генерации стимулированного ВУФ-излучения димера Xe^*Kr в капиллярном разряде постоянного тока // Оптич. ж. 2007. Т. 74, № 9. С. 3–10.
9. Герасимов Г.Н. Оптические спектры бинарных смесей инертных газов // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174, № 2. С. 155–175.
10. Morozov A., Krylov B., Gerasimov G., Arnesen A., Hallin R. VUV emission spectra from binary rare gas mixtures near the resonance lines of XeI and KrI // J. Phys. D. 2003. V. 36. P. 1126–1134.

M.I. Lomaev, D.A. Sorokin, V.F. Tarasenko. VUV radiation of the binary mixtures Ar–Xe and He–Xe during the diffuse nanosecond discharge in the non-uniform electric field.

Optical emission in the range 145–150 nm of the mixtures of argon and helium with minor xenon admixture at the excitation by the nanosecond diffuse discharge, formed in inhomogeneous electric field has been investigated. Oscillograms of the radiation pulses were registered. In addition, values of absorption coefficients of the radiation of He–Xe and Ar–Xe mixtures from the various parts of the spectrum have been estimated. It is shown, that at xenon content of $\sim 0.1\%$ and less the bandwidth in the emission range of Xe resonant line decreases to instrumental function width and its maximum matches with one of the resonant lines of the xenon (146.96 nm XeI, transition $5p^36s(^3P_1) \rightarrow 5p^6(^1S_0)$).