

ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 537.527.9; 537.53

**ВУФ-излучение гетероядерных димеров и его усиление  
в плазме высоковольтного наносекундного разряда,  
иницируемого убегающими электронами, в смеси Ar–Xe**

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

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

Поступила в редакцию 10.02.2016 г.

При возбуждении бинарной смеси инертных газов Ar–Xe при давлении 400 мбар высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами, зарегистрировано узкополосное излучение ВУФ-диапазона спектра (вблизи длины волны 147 нм), соответствующее оптическому переходу гетероядерного димера ArXe\*. Обнаружены усилительные свойства плазмы разряда в отношении данного излучения.

*Ключевые слова:* ВУФ-излучение, гетероядерный димер, гомоядерный димер, высоковольтный наносекундный разряд, убегающие электроны; VUV radiation, heteronuclear dimer, homonuclear dimer, high-voltage nanosecond discharge, runaway electrons.

**Введение**

Среди существующих на сегодняшний день источников ВУФ-излучения (синхротроны, ондуляторы, светодиоды) [1, 2] наиболее широко распространены излучатели, основу которых составляет получаемая различными способами плазма, в частности газоразрядная. Крайне интересной представляется неравновесная плазма, реализуемая при возбуждении инертных газов повышенного давления. В такой плазме возникают частицы – димеры (молекулы, состоящие из двух атомов) инертных газов [3, 4], длина волны излучения которых лежит в ВУФ-области спектра. Необходимо отметить разлетный характер основного состояния таких частиц, что является их особенностью и представляет важность с точки зрения создания лазера. Тем не менее создание неравновесной плазмы в результате электрического возбуждения инертных газов (в особенности тяжелых: Ar, Kr, Xe) при высоком давлении (порядка атмосферного и выше) – непростая задача. При этом образование таких частиц тем эффективнее, чем выше давление газовой среды.

Возбуждение чистых инертных газов высоковольтным наносекундным разрядом, инициируемым убегающими электронами [5], позволяет формировать неравновесную плазму при давлениях инертных газов порядка атмосферного, в результате чего основная доля (~90%) регистрируемого из плазмы разряда излучения лежит в ВУФ-области спектра

и испускается гомоядерными димерами (димеры из атомов одного сорта, например, Kr<sub>2</sub><sup>\*</sup>) инертных газов [6, 7]. Данное обстоятельство указывает на то, что использование указанного выше способа возбуждения могло бы лечь в основу создания электро-разрядного лазера ВУФ-диапазона на димерах инертных газов. Однако, согласно теоретическим работам, давление, при котором возможно получение генерации, составляет для ксенона 2 атм [8], а для криптона 6 атм [9], что представляет собой нетривиальную задачу даже при использовании данного типа разряда.

С другой стороны, известно ([10] и ссылки в ней) о возможности получения ВУФ-излучения при создании разрядной плазмы в бинарных смесях инертных газов (например, Kr–Xe), в которых более тяжелый газ играет роль примеси. Эмиссия излучения из плазмы разряда в этом случае, согласно [10], происходит в результате спектральных переходов в частицах, называемых гетероядерными димерами инертных газов (димеры из атомов разного сорта, например, KrXe\*). Спектральное распределение энергии излучения в этом случае представляет собой узкую полосу, лежащую вблизи длины волны одной из резонансных линий атома газа, играющего роль примеси. Примечательно, что в этом случае, ввиду иного канала формирования излучающих частиц, возможно получение генерации при более низких давлениях, чем в случае чистых инертных газов. Так, в работе [11] сообщалось о получении лазерного излучения при возбуждении капиллярным тлеющим разрядом смеси инертных Kr–Xe при общем давлении ~10 мбар.

Что касается высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами,

\* Дмитрий Алексеевич Сорокин (SDmA-70@loi.hcei.tsc.ru); Михаил Иванович Ломаев (Lomaev@loi.hcei.tsc.ru); Виктор Федотович Тарасенко (VFT@loi.hcei.tsc.ru).

то в работе [12] при возбуждении чистых инертных газов Ar и Kr, в которых так или иначе присутствуют следы Xe, зарегистрирована узкая полоса излучения вблизи длины волны 147 нм, соответствующей длине волны резонансной линии атома XeI. Позже в работе [13] было проведено исследование спектральных и амплитудно-временных характеристик излучения плазмы такого разряда в He и Ar с добавками Xe.

Тем не менее наиболее интересным с точки зрения создания ВУФ-лазера на димерах инертных газов с электроразрядным способом накачки исследованиям усилительных свойств плазмы внимания уделено не было. Следует отметить, что источников вынужденного излучения в ВУФ-диапазоне на основе инертных газов или их смесей с возбуждением электрическим разрядом не создано до сих пор.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании усилительных свойств плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в бинарной смеси инертных газов в отношении узкополосного ВУФ-излучения вблизи длины волны 147 нм.

## Экспериментальная установка

Экспериментальные исследования в настоящей работе проводились на установке, схематичное изображение которой представлено на рис. 1.

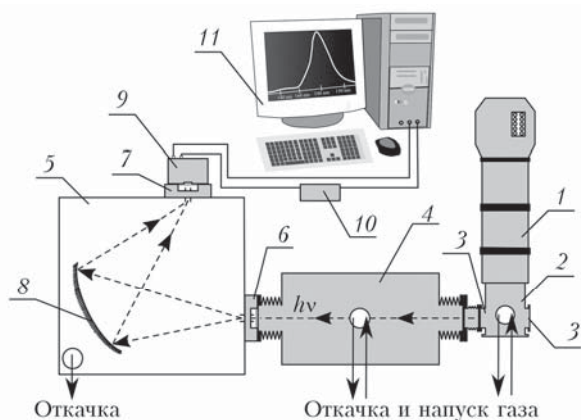


Рис. 1. Схематичное изображение экспериментальной установки: 1 – генератор импульсов напряжения РАДАН-220; 2 – разрядная камера; 3 – боковые окна разрядной камеры; 4 – герметичный металлический тракт; 5 – вакуумный монохроматор VM-502; 6, 7 – входное и выходное окна монохроматора; 8 – дифракционная решетка; 9 – ФЭУ ЕМІ-9781В; 10 – блок управления монохроматором; 11 – персональный компьютер

Формирование высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, осуществлялось в разрядной камере 2, выполненной из нержавеющей стали и имеющей форму цилиндра диаметром 56 мм. Камера была подключена к системе откачки и напуска газов на основе металлических трубок, содержащей баллоны с газом, датчики для контроля за давлением, а также насосы – пластинчато-роторный Scroll Pump Dry

Run II (ILMVAC, Germany) и турбомолекулярный Varian Turbo-V 81-T (Agilent Tech., USA). Используемые насосы позволяли осуществлять безмасляную откачку разрядной камеры и системы в целом. Зажигание разряда в камере происходило в результате подачи высоковольтных импульсов напряжения от генератора РАДАН-220 1 [14]. Данный генератор способен формировать импульсы напряжения как положительной, так и отрицательной полярности с амплитудой до 250 кВ. Длительность импульса напряжения на согласованной нагрузке и длительность его нарастания в передающей линии составляют 2 и 0,5 нс соответственно. В настоящей работе зажигание разряда происходило при отрицательной полярности импульса напряжения.

Для вывода излучения плазмы разряда из камеры использовались боковые окна разрядной камеры 3. Ввиду того что в данной работе исследования были связаны с регистрацией излучения в ВУФ-диапазоне длин волн (140–150 нм), использовались окна, выполненные из флюорита (фторида кальция  $\text{CaF}_2$ ), а его транспортировка в вакуумный монохроматор VM-502 5 (Acton Research Inc.), оснащенный ФЭУ ЕМІ-9781В 9, осуществлялась посредством откачиваемого металлического тракта 4. Это позволяло избежать потерь излучения данного спектрального диапазона, связанных с сильным поглощением в воздухе. Откачка полости вакуумного монохроматора производилась магнито-разрядным насосом, что обеспечивало в нем остаточное давление  $\sim 10^{-7}$  мбар. Управление монохроматором и ФЭУ осуществлялось при помощи блока 10. Спектральная полуширина аппаратной функции системы регистрации, измеренная посредством регистрации линии атома ртути с длиной волны 253,6 нм, составила  $\sim 3$  Å.

Конструкция разрядной камеры приведена на рис. 2.

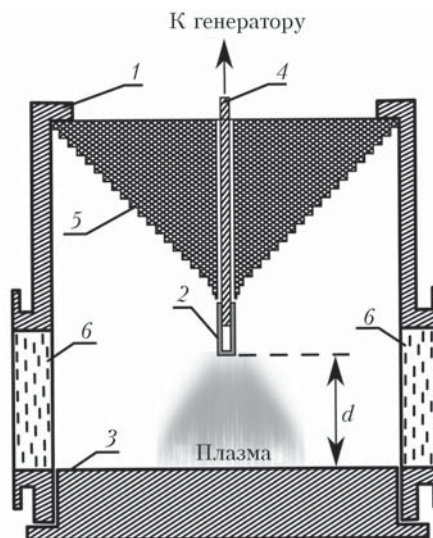


Рис. 2. Конструкция разрядной камеры: 1 – металлический корпус разрядной камеры; 2 – потенциальный катод-трубка; 3 – заземленный плоский анод; 4 – потенциальный ввод; 5 – изолятор; 6 – выходные окна камеры из  $\text{CaF}_2$

Формирование плазмы происходило между потенциальным электродом с малым радиусом кривизны (катод) 2 и плоским заземленным электродом (анод) 3. Катод был выполнен в виде цилиндра диаметром 6 мм из фольги из нержавеющей стали толщиной 100 мкм. Анодом служила алюминиевая пластина. Расстояние  $d$  между электродами составляло 12 мм. Сбор и обработка данных производились при помощи персонального компьютера (11 на рис. 1).

Для съемки интегральных фотографий свечения разрядной плазмы использовалась цифровая камера SONY.

## Результаты эксперимента

В настоящей работе высоковольтный наносекундный разряд, инициируемый убегающими электронами, зажигался в бинарной смеси инертных газов аргон–ксенон (Ar–Xe). В этом случае Ar играл роль основного газа, а Xe – небольшой добавки, концентрация которой в смеси варьировалась в диапазоне 0,005–10%. В ходе проведения предварительных экспериментов было выявлено, что оптимальным для зажигания разряда является давление смеси 400 мбар. Это объясняется тем, что при данном значении давления разряд зажигается в форме диффузных струй, начинающихся с ярких пятен на потенциальном электроде с малым радиусом кривизны (рис. 3, *a*) и сохраняется на протяжении всего времени горения. При этом имеет место стабильный и достаточный для регистрации сигнал оптического излучения из плазмы разряда в диапазоне длин волн 140–150 нм. Увеличение давления смеси приводило к контрагированию разряда, а его уменьшение – к снижению амплитуды оптического сигнала.

Как было показано в работе [13], спектр излучения плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в диапазоне длин волн 140–150 нм сильно зависит от содержания ксенона в смеси. При содержании Xe менее 0,1% спектр излучения плазмы в указанном диапазоне формируется резонансным переходом атома XeI с центральной длиной волны 146,96 нм [15]. При концентрации ксенона в смеси выше 1% спектр излучения в диапазоне длин волн 140–150 нм формируется преимущественно оптическими переходами гомоядерных димеров Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup> (первый континуум) [16]. Если же доля ксенона в смеси составляет 0,1–1%, то спектральное распределение излучения плазмы разряда в диапазоне 140–150 нм имеет вид, приведенный на рис. 3, *б*. Спектр излучения представляет собой узкую полосу шириной по основанию  $\Delta\lambda \leq 2$  нм, состоящую по крайней мере из двух компонентов – коротковолновой *S* и длинноволновой *L*, которая испускается, согласно [10], в результате спектральных переходов гетероядерного димера ArXe<sup>\*</sup>.

Следует отметить, что спектральное распределение энергии излучения на рис. 3, *б* не является

первым континуумом гетероядерного димера Xe<sub>2</sub><sup>\*</sup>, так как лежит в области более коротких длин волн.

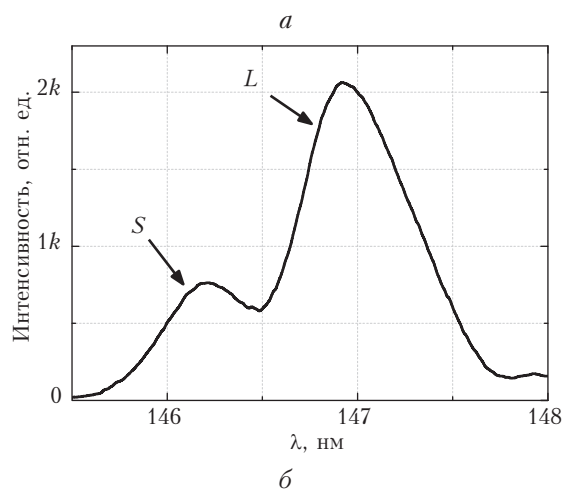


Рис. 3. Интегральная фотография свечения разряда в смеси Ar–Xe (*a*). *K* – трубочатый потенциальный катод диаметром 6 мм; *A* – заземленный плоский алюминиевый анод; *И* – изолятор. Спектральное распределение энергии излучения гетероядерного димера ArXe<sup>\*</sup> из плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси Ar–Xe (*б*); *S* – коротковолновая часть, *L* – длинноволновая. Давление смеси 400 мбар. Содержание ксенона 1%.  $d = 12$  мм

Как известно, резонансное излучение атома ксенона на длине волны 146,96 нм подвержено сильному самопоглощению. С использованием этого факта было проведено экспериментальное исследование, направленное на проверку принадлежности эмиссионного спектра (см. рис. 3, *б*) плазмы разряда в смеси Ar–Xe резонансному переходу атома XeI. Для этого металлический тракт между разрядной камерой и вакуумным монохроматором (4 на рис. 1) заполнялся чистым ксеноном, образуя газовый



фильтр, и исследовалось влияние давления ксенона в фильтре на вид эмиссионного спектра плазмы разряда в смеси Ar–Xe и чистом Xe в диапазоне длин волн 140–150 нм, проходящего через этот газовый фильтр. В чистом ксеноне зажегся тлеющий разряд при давлении ~1,5 мбар, для чего на промежуток подавался импульс напряжения амплитудой 350 В. Для дальнейшего анализа использовались выражения

$$I = I_0 e^{-\chi l} = I_0 e^{-(\sigma N)l}, \quad (1)$$

$$\operatorname{tg}(\alpha) = (I\sigma). \quad (2)$$

Здесь  $I$  — интенсивность излучения, прошедшего через газовый фильтр,  $I_0$  — интенсивность излучения, прошедшего через вакуум;  $\chi$  — коэффициент поглощения, выражаемый через сечение поглощения  $\sigma$  и концентрацию атомов ксенона  $N$ ;  $l$  — длина трассы, проходимой излучением (длина газового фильтра).

На основании закона Бугера–Ламберта–Бера (1) были получены данные о сечениях поглощения для излучения плазмы разряда в чистом ксеноне, а также для компонентов  $S$  и  $L$  спектра излучения плазмы разряда в смеси Ar–Xe. В этом случае для каждой спектральной составляющей строились зависимости  $\ln(I_0/I)$  от концентрации  $N$  атомов ксенона в газовом фильтре, после чего сечение поглощения могло быть вычислено при помощи выражения (2) по тангенсу угла наклона полученных прямолинейных зависимостей (1, 2 и 3 на рис. 4).

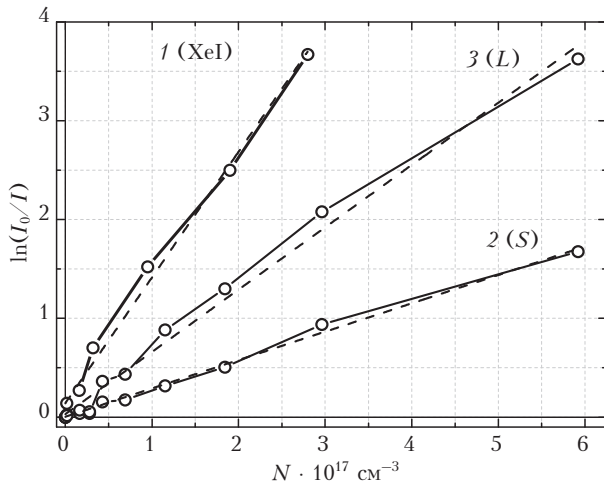


Рис. 4. Логарифм отношения интенсивностей  $\ln(I_0/I)$  излучения плазмы разряда в чистом ксеноне для резонансной линии 146,96 нм (1) и в смеси Ar–Xe для спектральных компонентов  $S$  (2) и  $L$  (3) как функция концентрации  $N$  ксенона в газовом фильтре

Как видно из данных, приведенных в таблице, значения сечений поглощения для спектральных компонентов  $S$  и  $L$  и резонансной линии атома ксенона различны. Это указывает на то, что спектр излучения плазмы разряда в смеси Ar–Xe в данной спектральной области (вблизи длины волны 147 нм) формируется в результате оптического перехода не

в атоме XeI, а в другой частице — гетероядерном димере ArXe\*. Также утверждение о принадлежности представленного на рис. 3, б спектра излучения гетероядерному димеру инертных газов основывается и на том, что подобный вид спектрального распределения энергии излучения регистрировался в работе [10], где при использовании иных способов возбуждения формировалась неравновесная плазма в бинарных смесях инертных газов (Ar–Xe, Kr–Xe), в которых более тяжелый газ играл роль небольшой добавки.

#### Значения сечений поглощения в ксеноне для излучения резонансной линии атома XeI и компонентов $S$ и $L$ в спектре излучения плазмы разряда в смеси Ar–Xe

Спектральный компонент	Сечение поглощения $\sigma$ , см <sup>2</sup>
Резонансная линия 146,96 нм, Xe	$13 \cdot 10^{18}$
Коротковолновая часть ( $S$ ), Ar–Xe	$3 \cdot 10^{18}$
Длинноволновая часть ( $L$ ), Ar–Xe	$6,5 \cdot 10^{18}$

Помимо того, были проведены эксперименты, направленные на исследование усилительных свойств плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси Ar–Xe по отношению к излучению вблизи длины волны 147 нм. Схема эксперимента приведена на рис. 5.

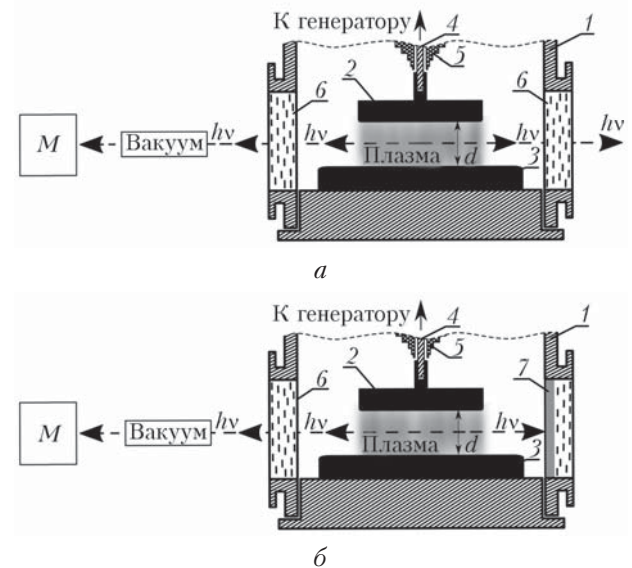


Рис. 5. Схема исследования усилительных свойств плазмы разряда: а — с двумя прозрачными для излучения окнами; б — с одним окном и зеркалом. 1 — металлический корпус разрядной камеры; 2 — потенциальный ножевой катод длиной 30 мм; 3 — заземленный ножевой анод длиной 50 мм; 4 — потенциальный ввод; 5 — изолятор; 6 — выходное окно камеры из CaF<sub>2</sub>; 7 — алюминиевое зеркало; М — монохроматор

В этом случае межэлектродный промежуток имел вид, представленный на рис. 5. Трубочатый и плоский электроды (2 и 3 на рис. 2) были заме-

нены на два ножевых электрода, выполненных из фольги из нержавеющей стали толщиной 100 мкм: заземленный анод длиной 50 мм (3 на рис. 5) и потенциальный катод длиной 30 мм (2 на рис. 5), межэлектродное расстояние  $d$  между которыми составляло 10 мм. Фотография интегрального свечения плазмы разряда в промежутке с ножевыми электродами, заполненным смесью Ag–Xe при общем давлении 400 мбар и содержании Xe ~ 1%, представлена на рис. 6. Видно, что разряд носит диффузный характер (нет каналов контракции), который сохраняется на протяжении всего времени горения.



Рис. 6. Интегральная фотография свечения разряда в смеси Ag–Xe. К – потенциальный ножевой катод длиной 30 мм; А – заземленный ножевой анод длиной 50 мм. Давление смеси 400 мбар. Содержание ксенона 1%.  $d = 10$  мм

На рис. 7 представлено спектральное распределение энергии излучения плазмы разряда в смеси Ag–Xe, формируемой в промежутке с ножевыми электродами.

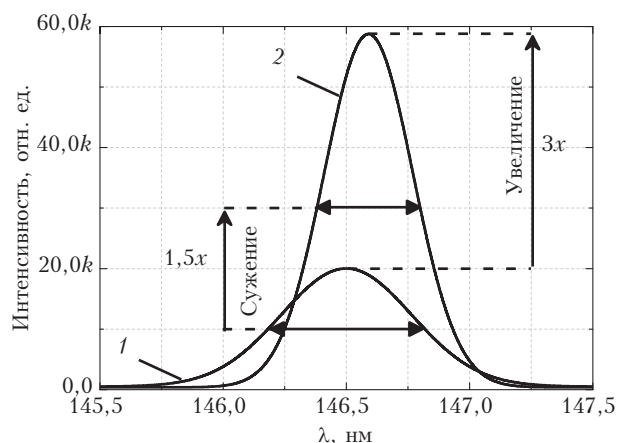


Рис. 7. Спектральное распределение энергии излучения гетероядерного димера  $AgXe^*$  из плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в смеси Ag–Xe. Давление смеси 400 мбар. Содержание ксенона 1%.  $d = 10$  мм. Потенциальный катод – нож длиной 30 мм. Заземленный катод – нож длиной 50 мм. 1 – выходные окна – две  $CaF_2$ -пластины; 2 – выходные окна –  $CaF_2$ -пластина и алюминиевое зеркало

Из рисунка видно (кривая 1), что увеличение длины плазменного образования приводит к замет-

ному (ср. с рис. 3, б) возрастанию интенсивности излучения гетероядерного димера, а кроме того, происходит сужение спектрального распределения энергии излучения. Для большей убедительности в наличии у плазмы разряда в смеси Ag–Xe усилительных свойств в отношении узкополосного излучения гетероядерного димера одно из выходных флюоритовых окон было заменено на алюминиевое зеркало (7 на рис. 5, б). Это, в свою очередь, привело к дальнейшему сужению (в 1,5 раза) полосы излучения и, самое главное, к трехкратному увеличению интенсивности излучения (кривая 2 на рис. 7). При этом важным является тот факт, что коэффициент отражения алюминиевого зеркала в данном спектральном диапазоне составляет величину меньше 1. Коэффициент отражения в ВУФ-диапазоне спектра даже самых лучших алюминиевых зеркал составляет 0,85 [17]. Кроме того, в данном случае, ввиду коротковолновости излучения, исключена возможность увеличения оптического сигнала в результате многократных отражений от стенок стальной разрядной камеры, что указывает на усиление излучения в разрядной плазме.

## Заключение

Таким образом, полученные результаты подтверждают наличие усилительных свойств у разрядной плазмы высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в бинарной смеси инертных газов Ag–Xe в отношении узкополосного излучения гетероядерного димера  $AgXe^*$ , спектральное распределение энергии которого лежит вблизи длины волны 147 нм.

Полученный результат указывает на возможность получения генерации при возбуждении данным типом разряда бинарных смесей инертных газов (Ag–Xe, He–Xe, Ar–Kr и т.д.), где более тяжелый компонент смеси играет роль примеси. Излучение в этом случае будет принадлежать ВУФ-диапазону спектра, а спектральное распределение его энергии лежать вблизи одной из резонансных линий более тяжелого газа. Кроме того, в полученном результате просматривается перспективность использования высоковольтного наносекундного разряда, инициируемого убегающими электронами, в качестве основы для создания ВУФ-лазера с электроразрядным вариантом накачки, активную среду в котором составляют возбужденные молекулы инертных газов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-29-00052.

1. Тернов И.М. Синхротронное излучение // Успехи физ. наук. 1995. Т. 65, № 4. С. 429–456.
2. Taniyasu Y., Kasu M., Makimoto T. An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometers // Nature. 2006. V. 441, iss. 7091. P. 325–328.
3. Экцимерные лазеры / Под ред. Ч. Роудза. М.: Мир, 1981. 247 с.
4. Герасимов Г.Н., Крылов Б.Е., Логинов А.В., Щукин С.А. Ультрафиолетовое излучение возбужденных

- молекул инертных газов // Успехи физ. наук. 1992. Т. 162. № 5. С. 123–156.
5. *Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges* / Ed. by V.F. Tarasenko. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. 598 p.
  6. *Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* Излучение плазмы объемного наносекундного разряда в ксеноне, криптоне и аргоне при повышенном давлении // Квант. электрон. 2006. Т. 36, № 6. С. 576–580.
  7. *Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х.* Мощный короткоимпульсный источник спонтанного излучения на димерах ксенона // Квант. электрон. 2007. Т. 37, № 6. С. 595–596.
  8. *Бойченко А.М., Яковленко С.И.* О возможностях накачки  $\text{Xe}_2^*$ -лазеров и ламп ВУФ-диапазона в послесвечении волны размножения электронов фона // Квант. электрон. 2006. Т. 36, № 12. С. 1176–1180.
  9. *Зверева Г.Н., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* О возможности применения объемного разряда, инициируемого пучком электронных лавин, для создания лазера на димерах криптона // Оптика и спектроскопия. 2007. Т. 102, № 1. С. 36–43.
  10. *Герасимов Г.Н.* Оптические спектры бинарных смесей инертных газов // Успехи физ. наук. 2004. Т. 174, № 2. С. 155–175.
  11. *Герасимов Г.Н., Халин Р., Крылов Б.Е., Арнесен А.* Механизм генерации стимулированного ВУФ-излучения димера  $\text{Xe}^*\text{Kr}$  в капиллярном разряде постоянного тока // Оптич. ж. 2007. Т. 74, № 9. С. 3–10.
  12. *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.
  13. *Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Тарасенко В.Ф.* Излучение в ВУФ-области спектра бинарных смесей аргона и гелия с ксеноном при диффузном наносекундном разряде в неоднородном электрическом поле // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 3. С. 226–229.
  14. *Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И.* Радан – малогабаритные высокопоточные ускорители электронов импульсно-периодического действия // Приборы и техн. эксперим. 1989. № 2. С. 146–149.
  15. *Смирнов Б.М.* Физика атома и иона. М.: Энергоатомиздат, 1986. 216 с.
  16. *Смирнов Б.М.* Эксиммерные молекулы // Успехи физ. наук. 1983. Т. 139, вып. 1. С. 53–81.
  17. *Методы исследования плазмы* / Под ред. В. Лохте-Хольтгревена. М.: Мир, 1971. 552 с.

***D.A. Sorokin, M.I. Lomaev, V.F. Tarasenko. VUV radiation of heteronuclear dimers and its amplification in the plasma of the high-voltage nanosecond discharge initiated by runaway electrons in the Ar–Xe mixture.***

A narrowband VUV radiation (near a wavelength of 147 nm) corresponding to optical transitions of the heteronuclear dimer  $\text{ArXe}^*$  from plasma formed during the excitation of the Ar–Xe mixture at a pressure of 400 mbar with high-voltage nanosecond discharge initiated by runaway electrons was registered. Amplifying properties of the discharge plasma with respect to this radiation were found.