

Излучение плазмы объемного наносекундного разряда в ксеноне, криптоне и аргоне при повышенном давлении

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

Исследованы излучательные свойства плазмы объемного наносекундного разряда, формируемого при повышенных давлениях ксенона, криптона и аргона в разрядном промежутке с катодом, имеющим малый радиус кривизны. Зарегистрированы и проанализированы спектры в области 120–850 нм и амплитудно-временные характеристики излучения ксенона при различных режимах и способах возбуждения. Показано, что при возбуждении объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин, не менее 90 % энергии в области 120–850 нм излучается димерами ксенона. При давлении ксенона 1.2 атм получена энергия спонтанного излучения в полный телесный угол ~ 45 мДж и длительность импульса излучения на полувысоте ~ 130 нс.

Ключевые слова: объемный разряд, ВУФ излучение димеров, возбуждение объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин и пучком электронов.

1. Введение

Объемные импульсные разряды в различных газах при повышенных давлениях широко используются для получения лазерного и спонтанного излучения [1–5]. Для формирования объемных разрядов при давлениях десятки и сотни торр и выше необходимо осуществлять предыонизацию разрядного промежутка, создавая высокую (более $10^6 - 10^9$ см $^{-3}$) начальную концентрацию электронов. В качестве источников предыонизации наибольшее распространение получило УФ и ВУФ излучение искровых и поверхностных разрядов, рентгеновское излучение и электронные пучки [1–5].

В работе [6] впервые, по-видимому, были получены объемные разряды («диффузные вспышки» [6]) при атмосферном давлении воздуха без применения источника дополнительной ионизации. Для этого на разрядный промежуток с катодом с малым радиусом кривизны подавались импульсы напряжения наносекундой длительности с амплитудой 120–130 кВ. В работах [7–10] была показана возможность получения в подобных разрядах при атмосферном давлении воздуха удельных энерговыделений в объемной стадии разряда ~ 1 Дж/см 3 [7–10] и удельных мощностей энерговывода до 800 МВт/см 3 [10]. Данный режим разряда в [7] было предложено называть объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ). Уникальность такого разряда, кроме высоких мощностей энерговывода, состоит в возможности получения объемных разрядов без предыонизации при высоких давлениях. Так, в гелии объемный характер разряда сохранялся при давлении 6 атм (используемое давление ограничивалось только прочностью разрядной камеры), а в азоте – до 3 атм [10].

Дополнительный интерес к ОРИПЭЛ связан с регистрацией в подобных условиях рентгеновского излучения

[6, 11–15] и пучков убегающих электронов субнаносекундной длительности [11, 15–19]. Объемные наносекундные разряды при повышенных давлениях атомарных и молекулярных газов в неоднородном электрическом поле, где катодом является электрод с малым радиусом кривизны, уже сейчас находят применение в различных областях. В частности, такой разряд был использован для предыонизации в лазерах повышенного давления с накачкой самостоятельным разрядом [12, 13] и для получения лазерного излучения в смеси Ar–Xe [10, 20]. Однако свойства подобных разрядов остаются малоизученными. Причинами этого являются, помимо прочего, малые времена развития разряда, а также сложности при регистрации тока разряда и напряжения на промежутке. Наибольшее внимание уделялось оптическим свойствам ОРИПЭЛ в области 200–600 нм. Так, были исследованы спектральные и амплитудно-временные характеристики излучения в азоте и воздухе [20–22], в том числе плотной плазмы у катода [22], а также в неоне, аргоне, криптоне и смесях Ar–Xe и Ar–N $_2$ [20]. Однако характеристики излучения инертных газов в ВУФ диапазоне не изучались. Причем такие исследования наиболее интересны для ксенона, который широко применяется для создания импульсных источников спонтанного ВУФ и УФ излучения [5, 23–26], возбуждаемых самостоятельным разрядом, а также для создания ВУФ лазеров на димерах ксенона, накачиваемых пучком электронов [1, 2].

Цель настоящей работы – исследование в широком спектральном диапазоне излучательных свойств плазмы объемного наносекундного разряда, формируемого при повышенных давлениях ксенона, криптона и аргона в разрядном промежутке с катодом, имеющим малый радиус кривизны. При этом основное внимание уделялось характеристикам излучения ксенона в ВУФ области спектра.

2. Экспериментальные установки и методики

Для исследования характеристик разряда была разработана камера и изготовлены система откачки и напуска газов, а также система регистрации излучательных и раз-

Е.Х.Бакшт, М.И.Ломаев, Д.В.Рыбка, В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 13 января 2006 г., после доработки – 18 апреля 2006 г.

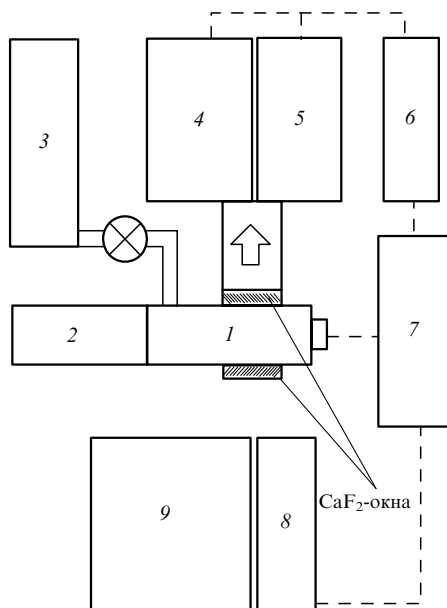


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – разрядная камера; 2 – генератор РАДАН-220; 3 – система откачки и напуска газов; 4 – вакуумный монохроматор VM-502; 5 – спектрометр EPP2000C-25; 6 – персональный компьютер; 7 – осциллограф; 8 – фотоприемник ФЭК-22СПУ; 9 – измеритель мощности и энергии ORHIR (Orptronics Inc.).

рядных характеристик. На созданной установке проведены эксперименты по формированию разряда и регистрации амплитудно-временных и спектральных характеристик излучения в диапазоне 120–850 нм. Схема экспериментальной установки и конструкция разрядной камеры показаны на рис.1 и 2. На разрядный промежуток подавались импульсы напряжения от генератора РАДАН-220, подробно описанного в [27]. Генератор имел волновое сопротивление 20 Ом и формировал на разрядном промежутке импульс напряжения с амплитудой до ~220 кВ, длительностью на полувывсоте ~2 нс и временем нарастания ~0.5 нс. Конструкция газовой диода показана на рис.2. Внутренний диаметр газовой камеры равнялся 48 мм. Использовались плоский анод и катод с малым радиусом кривизны, что обеспечивало дополнительное усиление поля у катода. Катод был выполнен в виде трубки из стальной фольги диаметром ~6 мм и толщиной стенки 50 мкм. Трубка закреплялась на металлическом стержне такого же диаметра. Плоский анод был изготовлен из латунной пластинки и соединен с корпусом камеры через шунт из сопротивлений ТВО. Расстояние между катодом и анодом варьировалось от 4 до 16 мм.

Возбуждение газов осуществлялось ОРИПЭЛ, а ксенон, кроме того, возбуждался контрагированным разря-

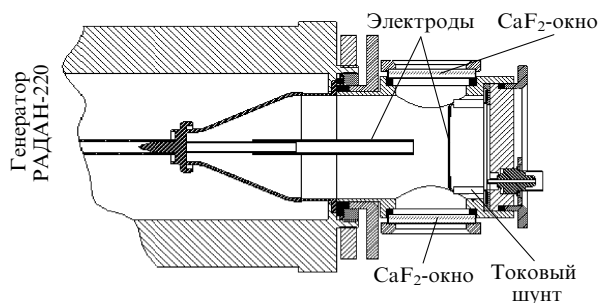


Рис.2. Конструкция разрядной камеры.

дом и пучком электронов. Контрагированная форма разряда реализовывалась за счет уменьшения разрядного промежутка и использования заостренного (с углом 60°) стального катода. При возбуждении пучком электронов к генератору РАДАН-220 подключалась электронная трубка ИМА3-150Э [28], которая помещалась в ту же камеру. Полная энергия электронного пучка, измеренная калориметром, составляла ~0.1 Дж. Значительное уменьшение энергии, вкладываемой в газ, при использовании одного и того же генератора связано с потерями при формировании и выводе пучка через бериллиевую фольгу толщиной 200 мкм.

Для регистрации сигналов с токового шунта применялся осциллограф TDS-3034 с полосой 0.3 ГГц (2.5 Гс/с). Свечение разряда фотографировалось цифровым фотоаппаратом. Спектры излучения в области от 200 до 850 нм регистрировались с помощью спектрометра EPP2000C-25 (StellarNet Inc.) с известной спектральной чувствительностью, а в области от 120 до 540 нм – с помощью вакуумного монохроматора VM-502 (Acton Research Corp.). Излучение для регистрации выводилось через боковые окна (рис.2). Спектральные приборы устанавливались относительно разрядной камеры таким образом, чтобы расстояние от плазменного образования, имевшего характерный размер ~1 см, до входной щели прибора составляло ~30 см. Это обеспечивало неизменность доли излучения, регистрируемой спектральным прибором, для всех частей плазменного образования. Спектральная чувствительность вакуумного монохроматора в диапазоне 120–200 нм оценивалась в относительных единицах исходя, во-первых, из известной для данного прибора кривой отражательной способности используемой дифракционной решетки в диапазоне 50–200 нм. Во-вторых, на входе используемого в монохроматоре фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) было установлено окно, покрытое слоем силициловокислого натрия, квантовая эффективность которого в пределах 40–340 нм не менялась. При построении спектров в диапазоне 120–850 нм осуществлялась «сшивка» спектров, зарегистрированных данными приборами в области длин волн вблизи 200 нм. Временные характеристики излучения в отдельных спектральных диапазонах регистрировались с помощью ФЭУ (EMI 9781 В), который разрешал передний фронт сигнала длительностью ~3 нс и задний фронт длительностью ~30 нс, и фотодиода ФЭК-22СПУ с временным разрешением ~1 нс. Временное разрешение осциллографа TDS-3034 также составляло ~1 нс.

Измерения энергии излучения проводились калиброванным фотоприемником ORHIR с фотоприемной головкой PE50BV. Для исключения влияния поглощения воздухом фотоприемная головка располагалась в откачиваемом объеме на расстоянии 10 см от продольной оси разрядного промежутка. При характерных размерах плазменного образования ~1 см для расчета доли излучения, падающей на фотоприемник, была использована модель точечного источника.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В ксеноне, криптоне и аргоне при давлении 0.3–1.5 атм был получен объемный разряд без источника дополнительной предьонизации. Фотография свечения разряда при давлении 1.2 атм показана на рис.3. Как и в пре-

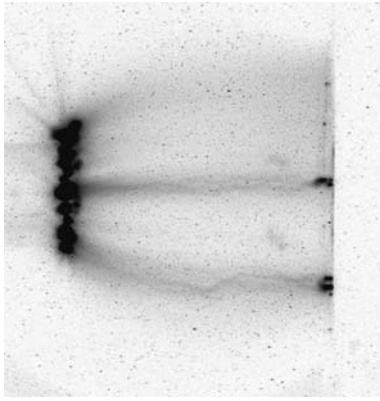


Рис.3. Фотография разряда в ксеноне при давлении 1.2 атм.

дыдущих работах, формировался диффузный (объемный) разряд в виде конуса или однородных струй. На электродах, прежде всего на катоде, были видны яркие пятна, размер которых не превышал 1 мм. При формировании ОРИПЭЛ на осциллограмме тока разряда отсутствовал выброс тока противоположной полярности, что свидетельствует о полной передаче энергии от генератора к плазме разряда. Оценки энергии, вкладываемой в плазму разряда в ксеноне и криптона при давлении 1–1.5 атм, дали значение ~ 1 Дж. Оценки были сделаны по энергии, запасаемой в высоковольтной линии генератора, и по току короткого замыкания. Удельная мощность энерговклада в часть промежутка с диффузным разрядом в этих условиях была не менее 100 МВт/см^3 , что на порядок превышает удельные мощности возбуждения в работах [5, 29].

Во всех инертных газах было зарегистрировано мощное широкополосное излучение переходов $A^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ и $B^3\Sigma_u^+ \rightarrow X^1\Sigma_g^+$ димеров инертных газов в ВУФ области спектра (рис.4). Спектральная полуширина полос для ксенона, криптона и аргона при давлении 1.2 атм составляла ~ 18 , ~ 13 и ~ 8 нм соответственно. Широкополосное излучение в УФ и видимой областях спектра было слабее по интенсивности на порядок и более. Энергия излучения димеров ксенона, криптона и аргона была равна не менее 90 % всей энергии излучения в диапазоне 120–850 нм. Наибольшая интенсивность излучения димеров наблюдалась в ксеноне. В криптона и аргононе интенсивность излучения димеров была соответственно в ~ 1.5 и ~ 2 раза меньше (на рис.4 спектры приведены с учетом относительной спектральной чувствительности

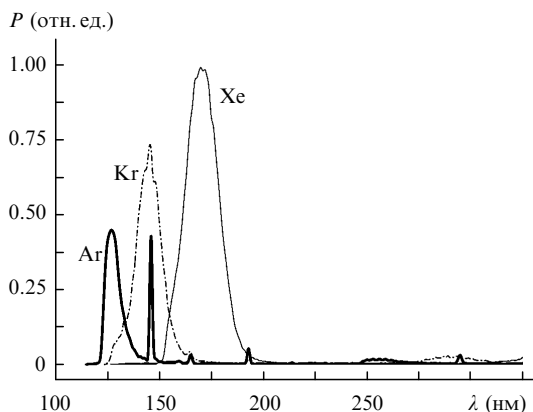


Рис.4. Спектры излучения при возбуждении ОРИПЭЛ ксенона, криптона и аргона (давление 1.2 атм).

системы регистрации на $\lambda = 126, 146$ и 172 нм). Полученное отношение интенсивностей излучения димеров ксенона и аргона (~ 2) существенно меньше, чем в работе [5]. В [5] интенсивность излучения димеров аргона была в 12 раз меньше, чем димеров ксенона. Узкая линия с длиной волны ~ 147 нм, регистрируемая в аргононе, является, по видимому, резонансной линией примеси ксенона с $\lambda = 146.96$ нм.

Для определения влияния способа возбуждения и режима горения разряда на спектральные характеристики излучения плазмы регистрировались спектры излучения плазмы разряда в ксеноне при изменении как давления (от 0.3 до 1.2 атм), так и межэлектродного расстояния (от 4 до 16 мм). Кроме того, регистрировались спектры излучения (при вышеуказанных давлениях) в случае возбуждения ксенона электронным пучком. На рис.5 приведены спектры излучения ксенона в объемном, при давлениях 0.3 и 1.2 атм, и контрагированном, при давлении 0.3 атм, разрядах. Видно, что при возбуждении ОРИПЭЛ характер спектра излучения слабо зависит от давления – в нем доминирует излучение димера ксенона ($\lambda \sim 172$ нм). Интенсивность излучения при давлении 1.2 атм в УФ и видимой областях спектра не превышает $\sim 1\%$ пиковой интенсивности излучения. Временной ход импульсов излучения на $\lambda = 172$ нм плазмы объемного разряда в ксе-

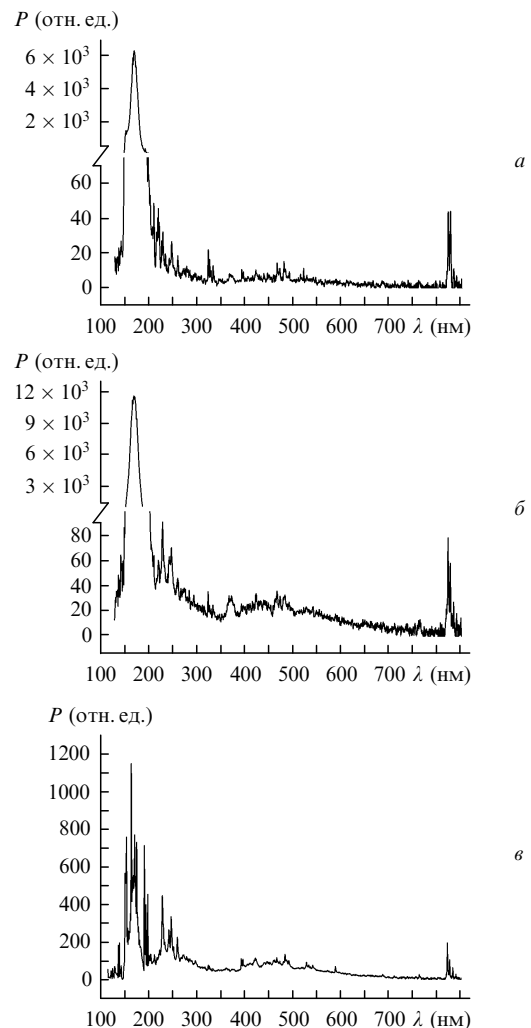


Рис.5. Спектры излучения ксенона в объемном разряде при давлениях 0.3 (а) и 1.2 (б), а также в контрагированном разряде при давлении 0.3 атм (в).

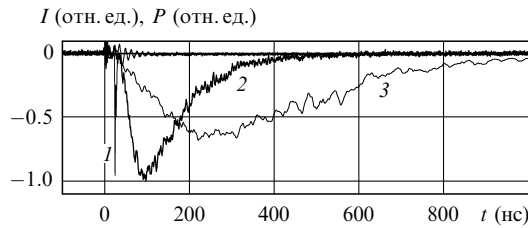


Рис.6. Осциллограммы импульса тока $I(I)$ и интенсивности излучения P на $\lambda = 172$ нм при давлениях ксенона 1.2 (2) и 0.3 атм (3). Амплитуда осциллограммы (3) увеличена в 10 раз.

ноне при давлениях 0.3 и 1.2 атм представлен на рис.6. Длительность импульса излучения на полувысоте составляет ~ 130 и ~ 420 нс для давлений 1.2 и 0.3 атм соответственно. При этом длительность на полувысоте зарегистрированного посредством ФЭК-22СП импульса люминесценции салицилата натрия, нанесенного на внутреннюю поверхность окна из CaF_2 (см. рис.2), составила ~ 100 нс. В то же время длительность импульса широкополосного излучения в УФ области спектра существенно меньше.

На рис.7 приведен спектр излучения ксенона при возбуждении пучком электронов. Хорошо видны полосы третьих континуумов [30] с максимумами на длинах волн 280 и 410 нм. При увеличении давления ксенона интенсивность излучения полосы с максимумом на длине волны 280 нм уменьшалась, а на длине волны 410 нм увеличивалась. Излучение третьих континуумов, благодаря повышению чувствительности системы регистрации по сравнению с [20], удалось зарегистрировать и при возбуждении ОРИПЭЛ (см.рис.5), однако их интенсивность относительно интенсивности вторых континуумов была существенно меньше, чем при возбуждении пучком электронов. Отметим, что данные исследования подтверждают выводы работы [31] о малой интенсивности излучения третьих континуумов при возбуждении пучком электронов, а также об увеличении интенсивности излучения ряда полос при уменьшении давления ксенона (рис.7). Мы считаем, что использование излучения третьих континуумов для получения лазерной генерации при возбуждении пучком электронов и ОРИПЭЛ бесперспективно.

Как видно из рис.5,а,б и 7,а, спектры излучения ксенона при возбуждении ОРИПЭЛ, пучком электронов наносекундной длительности и поперечным разрядом с УФ предьонизацией [5, 30] подобны, но существенно отличаются от спектра излучения контрагированного разряда (рис.5,в). В случае контрагированного разряда большая доля излучения приходится на УФ и видимую области спектра (200 до 600 нм). Данный спектр подобен спектру излучения импульсных ксеноновых ламп [25, 26].

Мы считаем, что применение ОРИПЭЛ очень перспективно для создания короткоимпульсных источников мощного спонтанного излучения в ВУФ области. Измерения энергии излучения димеров ксенона калориметром ОРНИР дали величину энергии в полный телесный угол ~ 45 мДж и импульсную мощность излучения ~ 300 кВт. Подобный источник может быть использован, например, для диссоциации XeF_2 в активной среде XeF -лазера на С–А-переходе с оптической накачкой [32]. Отметим, что полученные энергия излучения и мощность не являются предельными для данной установки. Проведенные измерения дают несколько заниженные значения энергии и мощности излучения димеров ксенона, т. к. часть энергии

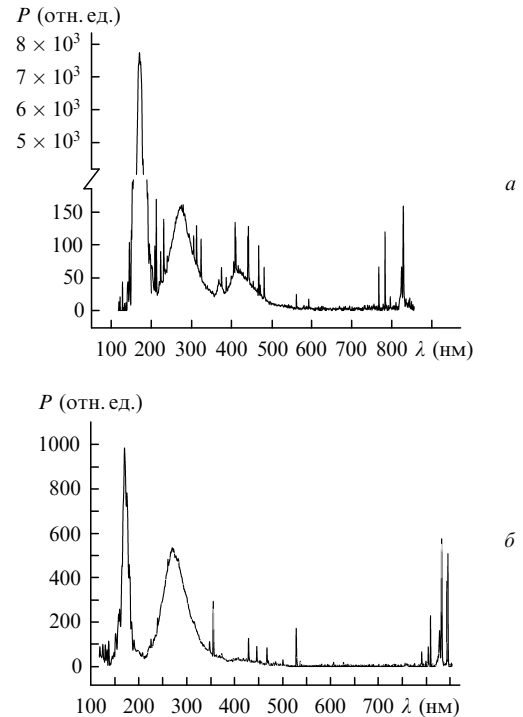


Рис.7. Спектры излучения ксенона при возбуждении пучком электронов при давлениях 1.2 (а) и 0.3 атм (б).

возбуждения теряется в шунтирующем разряде с держателя катода на корпус. Для уточнения эффективности преобразования энергии разряда в ВУФ излучение в будущем планируется провести дополнительные эксперименты на модернизированной камере, в том числе с контролем чистоты используемых газов.

Также перспективно применение ОРИПЭЛ для создания лазеров на димерах инертных газов. Оценки, проведенные для ксенона, показали, что в области 150–200 нм излучается более 90 % всей энергии, зарегистрированной в области 120–850 нм. Весьма важно, что при возбуждении короткими импульсами реализуется оптимальный режим плазменного лазера с накачкой самостоятельным разрядом [33]. Импульс возбуждения составляет несколько наносекунд, и генерация должна наблюдаться в послесвечении, когда поглощение активной среды на лазерной длине волны уменьшится.

Мы полагаем, что в исследованных условиях реализуется следующая динамика формирования объемного разряда в промежутке с катодом, имеющим малый радиус кривизны (см. [7] и обзоры [34, 35]). При подаче высоковольтного импульса напряжения происходит усиление электрического поля на катоде. Электрическое поле также усиливается после образования катодных пятен на плазменных сгустках, возникших за счет взрывной эмиссии электронов. В экспериментах с оборванным разрядом мы наблюдали во время нарастания импульса напряжения множество мелких плазменных образований на катоде [36]. При увеличении времени развития разряда (времени запаздывания срабатывания срезающего разрядника) размер и яркость части катодных пятен увеличивались, но число ярких пятен уменьшалось.

Вследствие усиления поля и быстрого увеличения напряжения на промежутке во время нарастания импульса напряжения часть электронов в прикатодной области переходит в режим «убегания» и ускоряется до энергий от

единиц до десятков килоэлектронвольт (быстрые электроны). Электроны набирают большую энергию, чем энергия, соответствующая максимуму сечения ионизации, и, двигаясь по направлению к аноду, осуществляют предварительную ионизацию газа. Незначительная доля этих электронов может дополнительно ускориться за счет так называемого поляризованного самоускорения электронов. Поляризованное самоускорение электронов на «фронте поляризованного стримера» было предсказано в [37]. Отметим также, что вследствие поляризованного самоускорения может ускоряться и часть электронов на фронте расширяющейся от катода плазмы объемного разряда. Известно, что плазма объемного разряда имеет на фронте, обращенном к аноду, область избыточного отрицательного заряда.

Таким образом, формирование объемного разряда в разрядном промежутке при неоднородном электрическом поле обусловлено предыонизацией газа в промежутке быстрыми электронами, которые формируются за счет усиления поля на катоде в катодных пятнах и в разрядном промежутке, а также перекрытием электронных лавин, плотность которых максимальна в прикатодной области разрядного промежутка.

В данной работе мы не ставили задачу исследовать режим формирования пучка убегающих электронов в разрядном промежутке [34, 35]. Однако рентгеновское излучение из разрядной камеры легко регистрировалось. Так, за 900 импульсов в Аг при давлении 1.2 атм экспозиционная доза вблизи выходного окна из CaF_2 толщиной 4 мм составила 7 мР. Поэтому при проведении экспериментов устанавливался защитный экран из свинца.

4. Заключение

Таким образом, исследования показали, что при возбуждении инертных газов ОРИПЭЛ основная энергия в области 120–850 нм излучается на переходах димеров инертных газов. При возбуждении ОРИПЭЛ энергия излучения третьих континуумов в области 120–850 нм относительно энергии излучения вторых континуумов меньше, чем при возбуждении электронным пучком, и составляет не более 10 % полной энергии излучения в ВУФ области. При возбуждении ксенона с объема плазмы $\sim 1 \text{ см}^3$ получена мощность излучения димеров $\sim 300 \text{ кВт}$.

Возбуждение ОРИПЭЛ весьма перспективно для создания мощных короткоимпульсных источников спонтанного излучения в ВУФ области спектра. Такие источники могут, в частности, использоваться для фотолитической накачки лазеров при получении мощных фемтосекундных импульсов излучения [32]. Также можно применять ОРИПЭЛ для создания активной среды электро-разрядных лазеров ВУФ диапазона на димерах инертных газов. Отметим, что удельная мощность энерговода в часть промежутка с диффузным разрядом при ОРИПЭЛ была не менее 100 МВт/см^3 , что на порядок превышает удельные мощности возбуждения в работах [5, 29], а объемный характер разряда в отличие от [5, 29] сохранялся при давлении 1.5 атм.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ (проект № 2706) и Программы «Фундаментальные проблемы нано- и пикосекундной электроники большой мощности».

Авторы благодарят С.Б.Алексеева за помощь в подготовке генератора РАДАН-220.

1. *Экзимерные лазеры*. Под ред. Ч.Роудза (М.: Мир, 1981).
2. *Газовые лазеры*. Под ред. И.Мак-Даниэля, У. Нигена (М.: Мир, 1986).
3. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Степанов Ю. Ю. *Электроразрядные экзимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
4. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 1995).
5. Кузнецов А.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А. *Письма в ЖТФ*, **19** (5), 1 (1993).
6. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н. *ЖТФ*, **39** (8), 1530 (1969).
7. Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 3, 94 (2003).
8. Тарасенко В.Ф., Яковленко С.И., Орловский В.М., Ткачев А.Н., Шунайлов С.А. *Письма в ЖЭТФ*, **77**, 737 (2003).
9. Тарасенко В.Ф., Шпак В.Г., Шунайлов С.А., Яландин М.И., Орловский В.М., Алексеев С.Б. *Письма в ЖТФ*, **29** (21), 1 (2003).
10. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **34** (11), 1007 (2004).
11. Тарасова Л.В., Худякова Л.Н., Лойко Т.В., Цукерман В.А. *ЖТФ*, **44** (3), 564 (1974).
12. Павловский А.И., Босамыкин В.С., Карелин В.И., Никольский В.С. *Квантовая электроника*, **3** (3), 601 (1976).
13. Буранов С.Н., Горохов В.В., Карелин В.И., Павловский А.И., Репин П.Б. *Квантовая электроника*, **18** (7), 891 (1991).
14. Костыря И.Д., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. *Письма в ЖТФ*, **31** (11), 19 (2005).
15. Тарасенко В.Ф., Любутин С.К., Рукин С.Н., Словиковский Б.Г., Костыря И.Д., Орловский В.М. *ЖТФ*, **75** (11), 69 (2005).
16. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Тарасенко В.Ф. *Письма в ЖТФ*, **30** (20), 35 (2004).
17. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Орловский В.М., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. *ДАН*, **398** (5), 611 (2004).
18. Tarasenko V.F., Shpak V.G., Shunailov S.A., Kostyrya I.D. *Laser and Particle Beams*, **23** (4), 545 (2005).
19. Тарасенко В.Ф., С.Б.Костыря И.Д. *Изв. вузов. Сер. Физика*, № 12, 3 (2005).
20. Костыря И.Д., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. *ЖТФ*, **74** (8) 35 (2004).
21. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. *ПТЭ*, № 1, 203 (1977).
22. Бабич Л.П., Лойко Т.В., Тарасова Л.В. *Известия вузов. Сер. Радиофизика*, **25** (10), 1131 (1982).
23. Kogelschatz U. *Pure & Appl. Chem.*, **62** (9), 1667 (1990).
24. Малиновский Г.Я., Мамаев С.Б., Михеев Л.Д., Москалев Т.Ю., Сентис М.Л., Черемискин В.И., Яловой В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 617 (2001).
25. Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Панченко А.Н., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф., Кришнан М., Томпсон Дж. *Квантовая электроника*, **35** (7) 605 (2005).
26. Рохлин Г.Н. *Разрядные источники света* (М.: Энергоатомиздат, 1991).
27. Загулов Ф.Я., Котов А.С., Шпак В.Г., Юрике Я.Я., Яландин М.И. *ПТЭ*, № 2, 146 (1989).
28. Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В., Фомин Е.А., Шпак В.Г. *ПТЭ*, № 4, 175 (1989).
29. Lam S.K., Lo D., Zheng C.E., Yuan C.L., Shangguan C., Yang T.L., Kochetov I.V. *Appl. Phys. B*, **75** (6–7), 733 (2002).
30. Бойченко А.М., Тарасенко В.Ф., Фомин Е.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **20** (1), 7 (1993).
31. Fedenev A.V., Tarasenko V.F. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4071**, 291 (2000).
32. Tcheremiskine V.I., Sentsis M.L., Mikheev L.D. *Appl. Phys. Lett.*, **81** (3) 403 (2002).
33. Гудзенко Л.И., Яковленко С.И. *Плазменные лазеры* (М.: Атомиздат, 1978).
34. Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. *Physica Scripta*, **72** (1), 41 (2005).
35. Tarasenko V.F., Yakovlenko S.I. *Plasma Devices and Operations*, **13** (4), 231 (2005).
36. Tarasenko V.F., Skakun V.S., Kostyrya I.D., Alekseev S.B., Orlovskii V.M. *Laser and Particle Beams*, **22** (1), 75 (2004).
37. Аскарьян Г.А. *Труды ФИАН*, **66**, 66 (1973).