

# Источник импульсно-периодического УФ излучения на основе объемного разряда, инициируемого в азоте пучком электронов лавин

Е.Х.Бакшт, А.Г.Бураченко, М.И.Ломаев, А.Н.Панченко, В.Ф.Тарасенко

*Создан протяженный источник импульсно-периодического спонтанного УФ излучения, который может быть использован и для получения лазерного излучения. На промежутке с неоднородным электрическим полем подавались импульсы напряжения с амплитудой в падающей волне до 30 кВ, длительностями на полувысоте  $\sim 4$  нс и фронта  $\sim 2.5$  нс. При длине возбуждаемой области 35 см и давлениях азота 30–760 Тор без применения дополнительной системы для предыонизации промежутка получен диффузный разряд, в том числе при частоте следования импульсов 2 кГц. Исследовано излучение плазмы объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин. С помощью ССD-камеры установлено, что при максимальных напряжениях плотная диффузная плазма заполняет промежуток за время менее 1 нс. Во всем диапазоне исследованных давлений за анодом из фольги было зарегистрировано рентгеновское излучение, а при давлениях менее 100 Тор коллектором зафиксирован сверхкороткий лавинный электронный пучок.*

**Ключевые слова:** протяженный источник УФ излучения, импульсно-периодический режим, объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин, излучение второй положительной системы азота, убегающие электроны, рентгеновское излучение.

## 1. Введение

В настоящее время продолжают исследования и разработки источников лазерного и спонтанного излучения различных спектральных диапазонов, в которых в качестве рабочей среды используются газы повышенного давления [1–3]. Для получения объемного разряда при повышенных давлениях применяются разряды, формируемые за счет предыонизации от дополнительных источников [4, 5]. В последние годы было показано, что при использовании объемного разряда, инициируемого пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ), могут быть созданы эффективные лазеры [6, 7] и источники УФ и ВУФ излучения с высокой импульсной мощностью [8–12]. Однако в лазерах и источниках спонтанного излучения, возбуждаемых ОРИПЭЛ, обычно использовался режим однократных импульсов [6–12]. При высоких частотах следования импульсов  $f$  для получения ОРИПЭЛ необходимо уменьшать энергию накачки в отдельном импульсе и сокращать его длительность. Импульсно-периодический режим ОРИПЭЛ без прокачки газа через промежуток был реали-

зован в работах [13–16]. В [13, 14] диффузный характер разряда при увеличении межэлектродного зазора  $d$  обеспечивался за счет уменьшения амплитуды тока через разрядный промежуток и удельного энерговклада. В работах [15, 16] сообщалось о создании миниатюрных ламп, излучающих на второй положительной системе азота и на линиях материала электродов. Объем излучающей области разряда составлял  $\sim 1$  мм<sup>3</sup>, а частота следования импульсов достигала 1 кГц. Режим ОРИПЭЛ при  $f = 1$  кГц был достигнут в результате уменьшения амплитуды и длительности импульса напряжения, а также размеров возбуждаемой области. Однако исследования источников спонтанного УФ излучения в импульсно-периодическом режиме при удельной мощности возбуждения ОРИПЭЛ более 1 МВт/см<sup>3</sup>,  $f \geq 1$  кГц и  $d \geq 0.5$  см ранее не проводились.

Целью настоящей работы является создание и исследование протяженного источника УФ излучения с возбуждением азота повышенного давления импульсно-периодическим разрядом.

## 2. Экспериментальная аппаратура и методики измерений

В наших экспериментах для формирования ОРИПЭЛ использовался четырехканальный генератор FPG-60 [17], который подключался к газоразрядным промежуткам одним или четырьмя кабелями длиной 4 м. Амплитуда падающей волны напряжения в передающей линии (кабель с волновым сопротивлением 75 Ом) могла регулироваться в пределах 0–30 кВ. Для исследования параметров разряда и излучения в более широком диапазоне экспериментальных условий применялись две разрядные камеры с различной конструкцией катодов и разными размерами разрядного промежутка. Катоды имели малый радиус кривизны, что приводило к усилению электрического поля на макро- и микро неоднородностях. В первой разрядной камере (рис. 1) с длиной возбуждаемой области  $\sim 35$  см ка-

Е.Х.Бакшт, А.Г.Бураченко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: VEN@loi.hcei.tsc.ru, BAG@loi.hcei.tsc.ru

М.И.Ломаев, А.Н.Панченко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; e-mail: Lomaev@loi.hcei.tsc.ru, alexei@loi.hcei.tsc.ru

В.Ф.Тарасенко. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 63405 Томск, просп. Ленина, 40; e-mail: VF@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 27 марта 2014 г., после доработки – 4 июня 2014 г.

тодами служили 50 или 100 швейных стальных иголок диаметром 0.7 мм, которые крепились к одному проводнику и устанавливались соответственно в один или два ряда. Анод имел закругленные края и был изготовлен из части цилиндра из нержавеющей стали радиусом 7 см. Межэлектродный зазор мог изменяться от 6 до 21 мм. На катод первой разрядной камеры по четырем кабелям подавались от генератора FPG-60 четыре идентичных импульса напряжения. Задержка между импульсами, приходящими на катод по различным каналам, была менее 1 нс. Камеры заполнялись азотом с содержанием примесей менее 0.01%. Исследуемый газ в этой камере мог прокачиваться через разрядный промежуток с помощью вентиляторов со скоростью до 20 м/с. Излучение разрядной плазмы регистрировалось через окна на торцевых фланцах.

На вторую разрядную камеру импульсы напряжения подавались по одному кабелю, а остальные три кабеля соединялись с резисторами номиналом 75 Ом. Соответственно мощность, выделяемая в разрядном промежутке при одинаковых напряжениях, была в 4 раза меньше, чем на первой разрядной камере. Применялись два катода – цилиндрический (диаметр 0.3 мм) из вольфрама и трубчатый (диаметр 6 мм, толщина стенки 0.2 мм) из нержавеющей стали. Анод был плоским и изготавливался из тонкой алюминиевой или медной фольги. Это позволяло регистрировать за анодом рентгеновское излучение и сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП). Межэлектродный зазор мог изменяться от 1 до 12 мм. Система прокачки азота через разрядный промежуток во второй камере отсутствовала, что приводило вначале, при увеличении частоты следования и амплитуды импульсов напряжения, к нестабильности положения разрядной плазмы в зазоре. С дальнейшим увеличением этих параметров наблюдалось контрагирование разряда. Однако при относительно малых амплитудах и частотах следования импульсов напряжения в промежутке, как и в работах [15, 16], формировался диффузный разряд.

Временной ход импульсов излучения регистрировался скоростным фотодиодом Photek PD025 Solar Blind и фотодиодом ФЭК-22 СПУ, расположенными на расстояниях  $\sim 3.5$  и  $\sim 7.4$  см от выходного окна на торцевом фланце пер-

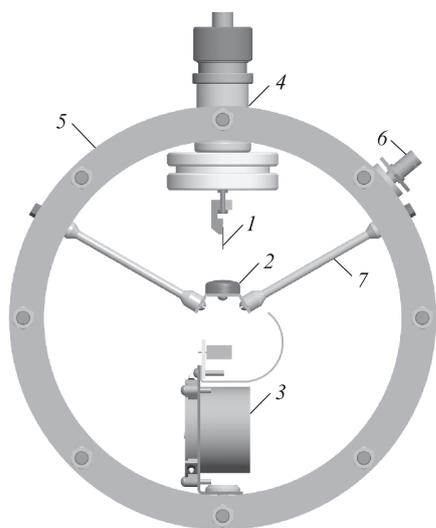


Рис.1. Конструкция первой разрядной камеры: 1 – катод из иголок; 2 – анод; 3 – вентилятор; 4 – ввод высокого напряжения; 5 – корпус камеры; 6 – вывод для измерения тока с шунта; 7 – обратный токопровод.

вой разрядной камеры соответственно. Спектры излучения разряда регистрировались спектрометрами EPP2000C-25 (StellarNet-Inc., рабочий диапазон 195–850 нм) и HR4000 (Ocean Optics B.V., рабочий диапазон 200–300 нм) с известными спектральными чувствительностями. Интегральное свечение разряда за один или несколько импульсов фотографировалось цифровым фотоаппаратом Sony A100. Динамика развития разряда регистрировалась CCD-камерой HSFC-PRO. Ток разряда измерялся с помощью шунта, изготовленного из чип-резисторов. Пучок убегающих электронов за фольгой регистрировался коллектором, а импульсы напряжения омическим (первая камера) или емкостным (вторая камера) делителем. Для записи электрических сигналов применялся цифровой осциллограф DPO70604 (6 ГГц,  $25 \times 10^9$  выборок·с<sup>-1</sup>) или TDS3054B (0.5 ГГц,  $2.5 \times 10^9$  выборок·с<sup>-1</sup>). Для регистрации рентгеновского излучения из разряда использовались сцинтиллятор и фотоэлектронный умножитель. Также применялась фотопленка Kodak RAR film 2497, помещенная в непроницаемый для света и мягкого рентгеновского излучения конверт с окошком, закрытым бериллиевой фольгой толщиной 15 мкм (длинноволновый край пропускания соответствовал энергии рентгеновских квантов  $\sim 0.7$  кэВ).

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В процессе проведения экспериментов получены следующие результаты. В широком диапазоне давлений азота (от 30 до 760 Тор) в промежутке острие–плоскость в отсутствие дополнительного источника предьонизации формировался диффузный разряд (ОРИПЭЛ), в том числе и при  $f = 2$  кГц. Как и в лазерах с накачкой поперечным разрядом [1, 5, 18], для формирования диффузного разряда в импульсно-периодическом режиме при повышенных частотах следования импульсов необходимо было осуществлять прокачку газа через промежуток. Отметим, что при использовании двух цилиндрических электродов разряд в азоте начинал контрагироваться при давлении более 100 Тор. Фотографии ОРИПЭЛ, полученные на первой камере, приведены на рис.2 и 3. На данной установке при  $f = 2$  кГц и скорости прокачки азота  $\sim 20$  м/с в зависимости от давления азота формировался диффузный (рис.2,а и рис.3) или коронный разряд (рис.2,б).

При больших зазорах (свыше 10 мм) и максимальном напряжении генератора для формирования ОРИПЭЛ следовало уменьшать давление в разрядной камере (рис.2,а). Свечение разряда при низких давлениях (менее 50 Тор) было однородным и яркие пятна на электродах отсутствовали. Увеличение давления в этих условиях (рис.2,б), а

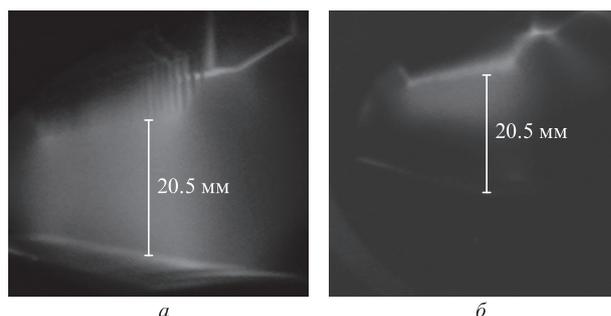


Рис.2. Фотографии излучения разряда при частоте следования импульсов  $f = 2$  кГц, межэлектродном зазоре  $d = 20.5$  мм и давлении азота в первой камере  $p = 30$  (а) и 80 Тор (б). Катод из игл вверх.

также уменьшение амплитуды импульса напряжения и частоты следования импульсов приводило к формированию коронного разряда. Положение светящейся границы коронного разряда зависело (при прочих неизменных условиях) от напряжения генератора. Ярких пятен на электродах при формировании коронного разряда также не было. Для формирования ОРИПЭЛ при давлении 760 Тор (рис.3) необходимо было уменьшить межэлектродный зазор до 6 мм. В этих условиях на катоде появлялись яркие пятна. Осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда при давлении азота 760 Тор, приведенные на рис.4,а, являются средними за 128 импульсов.

Для ОРИПЭЛ в азоте при  $f = 2$  кГц были проведены оценки пиковой удельной мощности возбуждения. Мощность возбуждения

$$P = UI_{\text{кон}}, \tag{1}$$

где  $U$  – напряжение на разрядном промежутке, измеренное делителем напряжения;

$$I_{\text{кон}} = I_{\text{осц}} - C_0 \frac{\partial U}{\partial t} \tag{2}$$

– ток проводимости, рассчитанный посредством вычитания из осциллограммы тока  $I_{\text{осц}}$  тока смещения;  $C_0$  – емкость «холодного» (без учета влияния плазмы при пробое) разрядного промежутка. Объем, занимаемый разрядной плазмой после пробоя, вычислялся по формуле

$$V \approx \frac{dw}{2} L, \tag{3}$$

где  $w$  и  $L$  – ширина плазменного образования вблизи плоского электрода и длина электродов соответственно. Удельная мощность возбуждения  $P_{\text{сп}}$  вычислялась на основании выражений (1)–(3):

$$P_{\text{сп}} \approx P/V. \tag{4}$$

Ее пиковое значение составило  $\sim 10$  МВт/см<sup>3</sup> для объема разрядной плазмы  $\sim 6$  см<sup>3</sup>.

Оценки плотности мощности спонтанного излучения в полный телесный угол были также проведены в предположении, что спектр импульса излучения не меняется на протяжении всего импульса. Формулы для расчета взяты из [19]. Расчет проводился по формуле

$$P_{\text{рад}} = I(t)k, \tag{5}$$

где  $I(t)$  – импульс тока фотодиода;

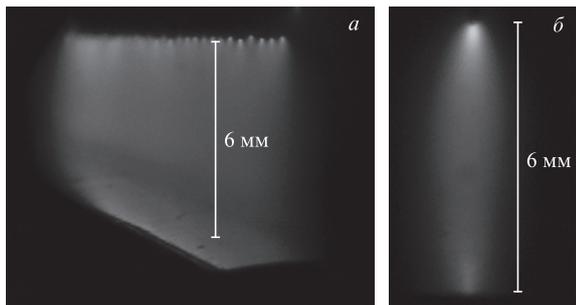


Рис.3. Фотографии излучения разряда в азоте при  $f = 2$  кГц,  $d = 6$  мм,  $p = 760$  Тор, полученные под углом к центральной оси разрядной области (а) и с торца первой камеры (б). Катод из игл вверх.

$$k = \frac{W}{\int I(t) dt} \tag{6}$$

– коэффициент пропорциональности;

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega(\lambda) d\lambda \tag{7}$$

– полная энергия (Дж);  $\lambda_1, \lambda_2$  – границы спектрального интервала, регистрируемые спектрометром;

$$\omega(\lambda) = \gamma A(\lambda) \tag{8}$$

– спектральная плотность энергии (Дж·м<sup>-1</sup>);  $A(\lambda)$  – спектральное распределение энергии излучения (отн. ед.·м<sup>-1</sup>);

$$\gamma = \frac{\int I(t) dt}{\delta \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} \chi(\lambda) A(\lambda) d\lambda} \tag{9}$$

– неизвестный размерный коэффициент пропорциональности (Дж);  $\chi(\lambda)$  – спектральная чувствительность фотодиода (А·Вт<sup>-1</sup>);  $\delta$  – доля излучения, регистрируемая прибором;  $\lambda_3, \lambda_4$  – пределы области спектральной чувствительности фотоприемника. При проведении оценок мощности учитывалось, что источник протяженный. Согласно оценкам, полная мощность излучения в угол  $4\pi$  составляет  $\sim 16$  кВт. Эта мощность увеличивается более чем на порядок при добавлении к азоту электроотрицательного газа SF<sub>6</sub>. Одновременно при использовании смесей с SF<sub>6</sub> существенно растет мощность лазерного излучения. Так, в работе [6] было показано, что мощность излучения УФ

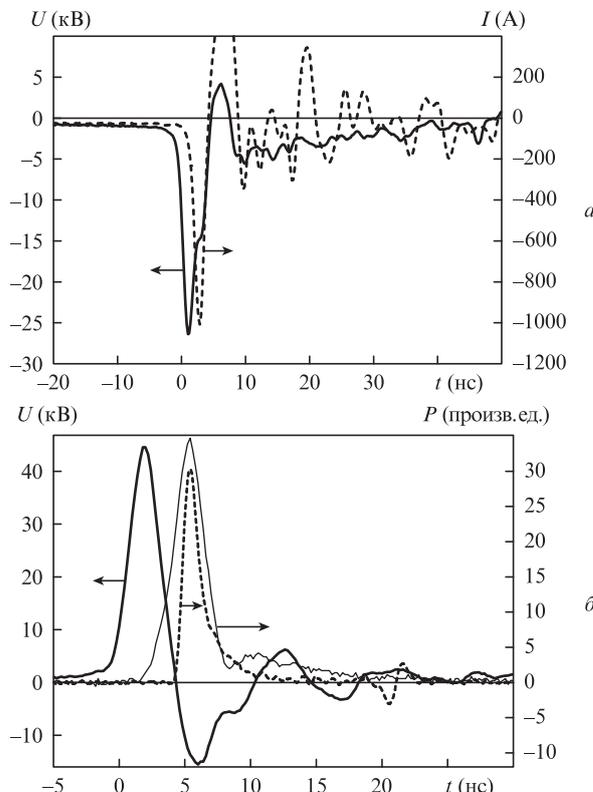


Рис.4. Осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда в азоте при  $f = 2$  кГц,  $d = 6$  мм и  $p = 760$  Тор (а) и импульсов напряжения (полярность на рисунке изменена на обратную), а также спонтанного (тонкая кривая) и лазерного (штриховая кривая) излучения в азоте при  $f = 0.4$  кГц,  $d = 6$  мм и  $p = 300$  Тор в первой разрядной камере (б).

азотного лазера при добавлении к азоту SF<sub>6</sub> увеличилась в 20 раз. Средние значения параметра E/p в процессе накачки в смеси азота с SF<sub>6</sub> выше, чем в азоте, и близки к оптимальным для лазера на второй положительной системе азота [6, 7] (E – напряженность электрического поля, p – давление азота).

Спектр излучения плазмы ОРИПЭЛ был типичным для диффузного разряда в азоте. Наибольшие интенсивности имели вторая положительная система азота и переход 0 → 0 полосы C<sup>3</sup>π<sub>u</sub> → V<sup>3</sup>π<sub>g</sub> (рис.5). Зависимости суммарной плотности мощности излучения в области 300–400 нм от давления и различных напряжений для первой разрядной камеры приведены на рис.6. Данные зависимости были получены при измерении плотности мощности излучения через окно на торцевом фланце (см. рис.1). Оптимальное давление азота при максимальном напряжении генератора (30 кВ в падающей волне напряжения) составило 270 Тор (рис.6,а). Благодаря прокачке азота через разрядный промежуток плотность мощности излучения в импульсе с ростом частоты следования импульсов практически не изменялась. Скорость прокачки 20 м/с была достаточна для сохранения плотности мощности излучения в отдельном импульсе при увеличении частоты до 2 кГц. Длина излучающей области в отсутствие индуцированного излучения, как и в работе [20], не оказывала существенного влияния на плотность мощности излучения. Так, уменьшение длины излучающей области от 35 до 4 см дало менее чем двукратное уменьшение плотности мощности излучения (рис.6,б). При проведении этих измерений в межэлектродный промежуток помещалась тонкая пластинка из диэлектрика. При этом характер разряда не менялся, а излучение из области за пластинкой фотодиодом не регистрировалось. С уменьшением напряжения оптимальные давления уменьшались, а с ростом давления уменьшалась длительность импульса излучения. При давлении азота 760 Тор длительность импульса УФ излучения на полувысоте составила ~1 нс.

Использование резонатора, состоящего из «глухого» зеркала с алюминиевым покрытием и кварцевой пластинки, приводило к достижению порога генерации на длине волны 337.1 нм. На рис.4,б приведены осциллограммы импульса напряжения, а также импульсов спонтанного и лазерного излучения при f = 400 Гц. Лазерный импульс запаздывает на 3 нс относительно импульса спонтанного

излучения и имеет вдвое меньшую длительность на полувысоте. В импульсно-периодическом режиме мощность лазерного излучения составила ~10 Вт.

С помощью CCD-камеры на второй установке было показано, что формирование диффузного разряда в промежутке без дополнительного источника предыонизации происходит при напряжении, превышающем 20 кВ, за время не более 1 нс (рис.7). Также за 1 нс на катоде могло появляться яркое пятно, положение которого во время данного импульса напряжения не изменялось. Спустя несколько наносекунд после подачи импульса напряжения на промежуток могли появляться новые катодные пятна (рис.7).

Проведенные исследования подтверждают возможность формирования диффузных разрядов в неоднородном электрическом поле при повышенных давлениях без источника дополнительной предыонизации (см., напр., [21] и ссылки в [21]). ОРИПЭЛ формируется за счет генерации убегающих электронов и рентгеновского излучения. На второй разрядной камере, условия возбуждения в

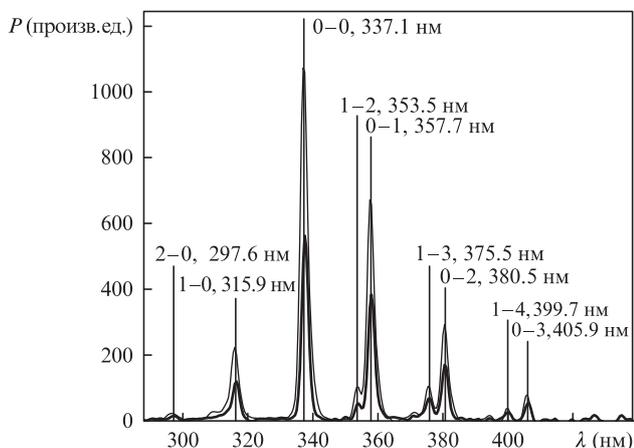


Рис.5. Спектры спонтанного излучения азота при f = 0.4 кГц, d = 6 мм, p = 300 Тор (тонкая кривая) и 600 Тор (жирная кривая) в первой разрядной камере. Вертикальными линиями указано положение кантов основных полос 2<sup>+</sup>-системы азота.

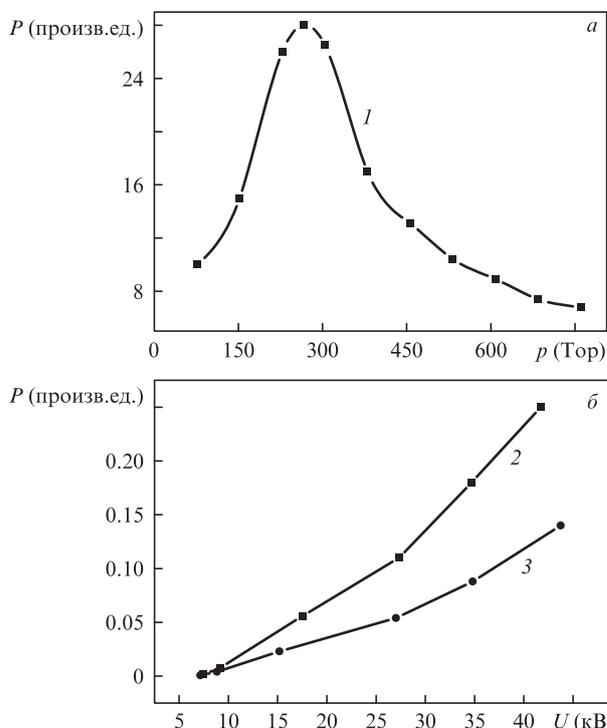


Рис.6. Зависимости плотности мощности излучения от давления (а) и напряжения на разрядном промежутке (б), полученные на первой разрядной камере при f = 0.4 кГц, d = 6 мм (1) и f = 0.4 кГц, d = 10 мм, p = 76 Тор (2, 3). Длина разрядной области 35 (2) и 4 см (3).

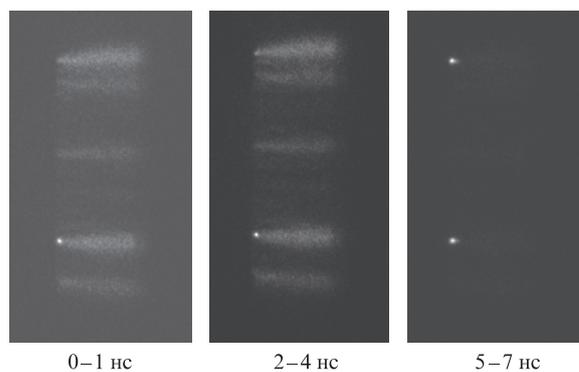


Рис.7. Фотографии излучения разряда в различные моменты времени после начала пробоя при f = 0.4 кГц, p = 760 Тор, d = 2 мм и U = 22 кВ, полученные на второй камере с трубчатым катодом.

которой были подобны условиям возбуждения на первой камере, за анодом из фольги регистрировалось рентгеновское излучение – как с помощью ФЭУ и сцинтиллятора, так и по автографам на фотопленке Kodak RAR. Причем с помощью фотопленки рентгеновское излучение было зарегистрировано при атмосферном давлении азота. При уменьшении давления до 100 Тор и ниже за анодом из фольги был зарегистрирован СЛЭП. Результаты детальных исследований генерации СЛЭП и рентгеновского излучения в импульсно-периодическом режиме на подобных установках приведены в работах [13, 14, 22, 23].

Основным процессом, в результате которого возбуждается уровень  $S^3\pi_u$  молекулы азота, является прямой удар электронами разряда (не пучка), как и в УФ азотных лазерах с накачкой поперечным разрядом. Основная роль пучка убегающих электронов заключается в формировании диффузного разряда при повышенных давлениях азота. Благодаря убегающим электронам диффузный разряд формируется при давлениях, превышающих 100 Тор, тогда как при возбуждении поперечным разрядом без дополнительного источника предыонизации разряд в случае повышенных давлений контрагируется. При низких давлениях (менее 100 Тор) эффективность излучения второй положительной системы азота в случае возбуждения поперечным разрядом больше, чем при возбуждении ОРИПЭЛ. Сравнительно малые эффективности УФ спонтанного и лазерного излучения при возбуждении азота ОРИПЭЛ обусловлены более низкими значениями параметра  $E/p$  на промежутке в процессе накачки. Генерация СЛЭП ограничивает максимальное напряжение на промежутке перед его пробоем [21]. Добавки  $SF_6$  к азоту увеличивают значения параметра  $E/p$  на промежутке в процессе накачки и повышают эффективность излучения второй положительной системы азота. При возбуждении ОРИПЭЛ смесей азота с  $SF_6$  эффективность генерации УФ азотного лазера резко возрастает и приближается к предельной ( $\sim 0.3\%$ ) [6, 7].

Возбуждение уровня  $S^3\pi_u$  молекулы азота прямым ударом электронами разряда подтверждают эксперименты по возбуждению смесей азота с  $SF_6$  пучком электронов [24]. Добавление  $SF_6$  к смеси азота с аргоном при возбуждении пучком электронов вызывает резкое уменьшение КПД азотного лазера. При накачке пучком электронов в отсутствие внешнего электрического поля добавление  $SF_6$  к азоту приводит к дополнительным потерям энергии электронов пучка на молекулах  $SF_6$ . В смесях азота с аргоном при накачке пучком электронов добавление  $SF_6$  приводит также к потерям энергии на образование молекул  $ArF^*$ , тогда как при накачке ОРИПЭЛ добавление  $SF_6$  позволяет достигать оптимальных значений параметра  $E/p$  на промежутке и, соответственно, средних энергий электронов в разряде. При неоптимальных параметрах импульса возбуждения и накачке поперечным разрядом добавление  $SF_6$  также приводит к увеличению КПД азотного лазера [25], но это увеличение обычно не превышает двух раз. При возбуждении азота пучком электронов без применения магнитного поля порог генерации на  $2^+$ -системе азота не достигался.

#### 4. Заключение

В настоящей работе проведены исследования спонтанного излучения и объемного разряда, формируемого

в азоте при повышенных давлениях за счет убегающих электронов и рентгеновского излучения, в том числе при частоте следования импульсов до 2 кГц. Получены данные о мощности спонтанного излучения при давлениях азота 30–760 Тор и длине возбуждаемой области до 35 см. Показано, что при возбуждении ОРИПЭЛ можно за счет давления азота регулировать длительность импульса излучения, которая при давлении 760 Тор уменьшилась до  $\sim 1$  нс. Эта длительность более чем на порядок меньше, чем в источнике спонтанного излучения без дополнительной предыонизации промежутка, в котором используется накачка поперечным разрядом с длительностью импульса 50–150 нс. В дальнейшем планируется провести исследования генерации и спонтанного излучения на эксиплексных молекулах в смесях инертных газов с различными галогенидами ( $F_2$ ,  $NF_3$ ,  $HCN$ ).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 14-29-00052) и РФФИ (грант № 14-08-00074).

1. Endo I., Walter R.F. *Gas Lasers* (New York: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007).
2. Sosnin E.A., Tarasenko V.F., Lomaev M.I. *UV and VUV Excilamps* (Saarbrücken, Deutschland, Germany: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2012).
3. Автаева С.В., Жданова О.С., Пикунев А.А. и др. *Новые направления в научных исследованиях и применении эксиламп* (Томск: STT, 2013).
4. Palmer A.I. *Appl. Phys. Lett.*, **25** (3), 138 (1974).
5. Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. *Pulsed Gas Lasers* (Washington: SPIE Press, 1995).
6. Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **39**, 1107 (2009).
7. Вильтовский П.О., Ломаев М.И., Панченко А.Н. и др. *Квантовая электроника*, **43**, 605 (2013).
8. Бакшт Е.Х., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **36**, 576 (2006).
9. Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 595 (2007).
10. Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **38**, 401 (2008).
11. Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А. и др. *Оптика и спектроскопия*, **107**, 40 (2009).
12. Герасимов Г.Е., Крылов Б.Е., Ломаев М.И. и др. *Квантовая электроника*, **40**, 241 (2010).
13. Shao T., Zhang C., et al. *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 021503 (2011).
14. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., et al. *J. Appl. Phys.*, **113**, 093301 (2013).
15. Ерофеев М.В., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В. *Квантовая электроника*, **40**, 561 (2010).
16. Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В., Ерофеев М.В. *Квантовая электроника*, **42**, 153 (2012).
17. Efanov V.M., Efanov M.V., Komashko A.V., et al. *Ultra-Wideband, Short Pulse* (Electromagnetics 9, Part 5, 2010).
18. Баранов В.Ю., Борисов В.М., Степанов Ю.Ю. *Электроразрядные эксимерные лазеры на галогенидах инертных газов* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
19. Ломаев М.И., Рыбка Д.В. *ПТЭ*, №3, 111 (2006).
20. Бойченко А.М., Скакун В.Ф., Тарасенко В.Ф. и др. *Квантовая электроника*, **20** (6), 613 (1993).
21. Алексеев С.Б., Губанов В.П., Костыря И.Д. и др. *Квантовая электроника*, **34** (11), 1007 (2004).
22. Ерофеев М.В., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В. *ЖТФ*, **83** (2), 52 (2013).
23. Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. *Физика плазмы*, **40** (5), 134 (2014).
24. Бычков Ю.И., Лосев В.Ф., Савин В.В., Тарасенко В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **46** (1), 81 (1978).
25. Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **31** (6), 489 (2001).