

УДК 537.527.2, 537.527.4, 537.531:535.3

*Е.Х. БАКШТ\*, \*\*, В.Ф. ТАРАСЕНКО\*, Ю.В. ШУТЬКО\*, М.В. ЕРОФЕЕВ\****ТОЧЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ С ЧАСТОТОЙ 1 кГц И КОРОТКОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ ИМПУЛЬСА<sup>1</sup>**

Исследовано излучение плазмы разряда при наносекундном пробое в неоднородном электрическом поле коротких межэлектродных промежутков. Использовались импульсы напряжения с амплитудой в падающей волне  $\sim 10$  кВ, длительностью на полувывоте  $\sim 1$  нс и фронтом  $\sim 200$  пс. Показано, что при импульсно-периодическом пробое в воздухе атмосферного давления промежутка длиной 0,5 мм, основной вклад в излучение плазмы дают линии материала электродов и континуум, а максимальная интенсивность излучения регистрируется в области 200–300 нм, где сосредоточено  $\sim 40$  % всей энергии излучения.

*Ключевые слова:* точечный источник УФ-излучения, импульсно-периодический разряд, спектральные характеристики излучения.

Источники спонтанного излучения УФ- и ВУФ-диапазонов в настоящее время интенсивно исследуются и находят широкое применение в различных областях науки и техники [1–3]. Однако разработанные и выпускаемые промышленно источники спонтанного излучения не удовлетворяют всем потребностям. Для ряда приложений нужны приборы с новыми свойствами. В частности, для калибровки спектральных приборов и оптических элементов необходимы точечные источники УФ- и ВУФ-излучения с объемом излучающей области  $\sim 1$  мм<sup>3</sup> и сравнительно большой импульсной мощностью излучения (более 1 Вт). Также представляют практический интерес создание источников с наносекундной длительностью импульса, которые работают в импульсно-периодическом режиме. Для создания импульсных источников с малой излучающей поверхностью наиболее часто применяют эксилампы барьерного разряда [2–4]. В таких источниках используют излучение от одного или нескольких диффузных микрозарядов. Однородность разряда при барьерном разряде при повышенных давлениях достигается за счет установки на одном или обоих электродах диэлектрических барьеров. Однако применение барьеров увеличивает размеры разрядной плазмы и ограничивает ток разряда. Второе приводит к уменьшению импульсной мощности излучения. Кроме того, оптимальные размеры межэлектродных промежутков в эксилампах барьерного разряда составляют 5–8 мм и зависят от состава газовой смеси.

Из литературы известно о создании УФ- и ВУФ-источников излучения, в которых для возбуждения используется объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ) [5–7]. Такие источники позволяют при малых частотах повторения получать большие (1 МВт в [5]) импульсные мощности излучения в ВУФ-области спектра и короткие длительности импульса. Однако для формирования ОРИПЭЛ обычно используют импульсы напряжения с амплитудой более 100 кВ и межэлектродные промежутки в 1 см и более.

В работе [8] была показана возможность использования режима ОРИПЭЛ для создания миниатюрных источников, работающих при частоте следования импульсов до 1 кГц. Длительность импульса излучения 2<sup>+</sup> системы азота при межэлектродном зазоре 2 мм в воздухе атмосферного давления составила  $\sim 3$  нс. Диффузный разряд в воздухе атмосферного давления формировался между двумя электродами с малым радиусом кривизны за счет использования усиления электрического поля на электродах и применения импульсов напряжения субнаносекундной длительности с амплитудой  $\sim 14$  кВ.

Целью настоящей работы является создание точечного короткоимпульсного источника УФ-излучения с объемом излучающей плазмы менее 1 мм<sup>3</sup>, работающего в импульсно-периодическом режиме. Проведение данной работы стимулировали результаты спектральных исследований работы [8]. Было обнаружено (см. рис. 5 в [8]), что при уменьшении межэлектродного зазора в области

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», ГК № 02.740.11.0562.

200–230 нм появляется новая полоса, которая имела слабую интенсивность по сравнению с излучением  $2^+$  системы азота.

В данных экспериментах использовался генератор FPG-10 с амплитудой импульсов напряжения в передающей линии до 12,5 кВ. Данная сборка генератора, по сравнению с используемой в работе [8], обеспечивала при работе на согласованную нагрузку большую длительность импульса напряжения на полувысоте ( $\sim 1$  нс) с длительностью фронта  $\sim 0,2$  нс на уровне 0,1–0,9. Генератор подключался к газоразрядному промежутку 50-омным кабелем длиной  $\sim 1$  м. Разряд формировался в воздухе атмосферного давления между двумя остриями электродами из нержавеющей стали, в качестве которых использовались стандартные медицинские иглы с внешним диаметром 0,5 мм. Исследования проводились при зазорах 0,5; 1 и 2 мм и частотах следования импульсов от 370 до 1050 Гц.

Временной ход импульсов излучения регистрировался скоростным фотодиодом Photek PD025 Low Noise S20. 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. Разряд фотографировался с помощью цифрового фотоаппарата Sony A100 и CCD-камеры HSFC-PRO. Для записи электрических сигналов применялся цифровой осциллограф DPO70604 (6 ГГц, 25 выборок·с<sup>-1</sup>).

Полученные результаты приведены на рис. 1 и 2. При межэлектродном зазоре 2 мм формировался диффузный разряд (рис. 1, *а*). В спектре излучения диффузного разряда, как и в работах [7–9], наблюдались в основном полосы второй положительной системы азота (рис. 2, *а*). При сокращении расстояния между электродами разряд становился искровым (рис. 1, *б*), но при этом на первом этапе зажигания разряда всегда присутствовала диффузная фаза. Это хорошо видно при

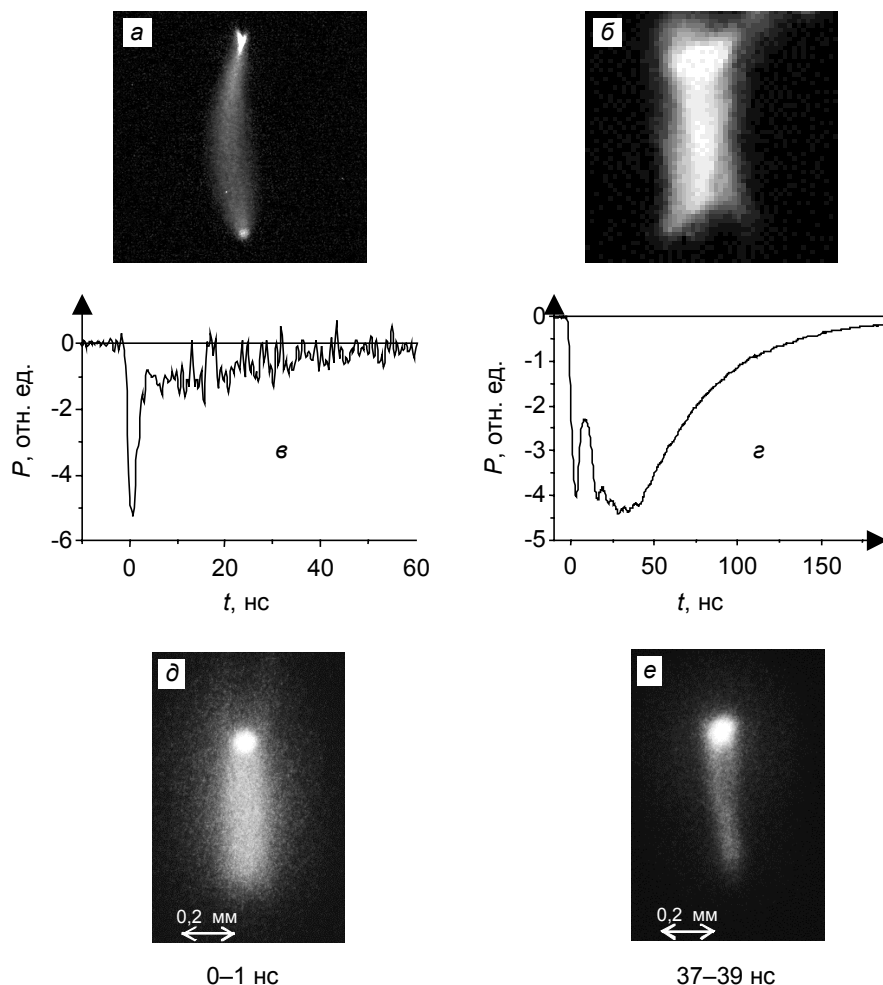


Рис. 1. Интегральные фотографии разряда с межэлектродным зазором  $d = 2$  мм (*а*) и 0,5 мм (*б*), снятые за один импульс, осциллограммы импульса излучения для  $d = 2$  мм (*в*) и 0,5 мм (*г*) и снятые за один импульс в разные моменты времени фотографии разряда (*д*, *е*)

сравнении рис. 1, *д* и *е*, на которых изображены фотографии разряда, снятые в разные моменты времени с помощью ССD-камеры. По-видимому диффузная фаза разряда соответствует ОРИПЭЛ.

Импульсы излучения для межэлектродных зазоров шириной  $d = 2$  и  $0,5$  мм приведены соответственно на рис. 1, *в* и *г*. Длительность импульса излучения на полувысоте для зазора  $d = 2$  мм составила  $\sim 3$  нс, а для зазора  $d = 0,5$  мм  $\sim 70$  нс. Столь большая разница в длительности импульсов излучения объясняется тем, что при зазоре 2 мм режим работы генератора FPG-10 был близок к согласованному, а при зазоре 0,5 мм – к режиму короткого замыкания.

При переходе от зазора 2 мм к зазору 0,5 мм изменялся также спектр разряда и его визуально воспринимаемый цвет становился белым (вместо фиолетового). В спектре помимо излучения полос  $2^+$  системы азота появлялось излучение континуума и дополнительные спектральные линии (рис. 2, *б*). При этом мощность излучения второй положительной системы азота практически не изменялась, а мощность широкополосного излучения и линий металла существенно увеличивалась. Энергия излучения в области 200–300 нм составила  $\sim 40\%$  от энергии во всем исследуемом спектральном диапазоне (200–850 нм). На рис. 2, *в* вместе со спектром излучения искрового разряда ( $d = 0,5$  мм), снятым с высоким разрешением, приведен для сравнения спектр излучения Fe в дуговом разряде. Наблюдается совпадение большинства линий в искровом спектре и линий спектра железа (для примера один из участков спектра увеличен). Это говорит о том, что наблюдаемые в искровом спектре линии соответствуют линиям паров материала электродов, в данном случае – железа. Для межэлектродного зазора  $d = 1$  мм в континууме и в спектральных линиях Fe было сосредоточено меньшее количество энергии по сравнению с  $d = 0,5$  мм, то есть этот случай является промежуточным при переходе от  $d = 2$  мм к  $d = 0,5$  мм.

Таким образом, в данной работе исследовано излучение плазмы разряда при пробое в неоднородном электрическом поле коротких межэлектродных промежутков (0,5; 1 и 2 мм).

Обнаружено, что при пробое в воздухе атмосферного давления зазора  $d = 0,5$  мм с резко-неоднородным электрическим полем на начальной стадии разряда присутствует диффузная фаза. Показано, что при пробое в этих условиях (0,5 мм) импульсами с амплитудой  $\sim 10$  кВ в падающей волне напряжений при частоте 1 кГц основной вклад в излучение плазмы дает излучение континуума и линии материала электродов, а в области 200–300 нм сосредоточено  $\sim 40\%$  всей энергии излучения. Предлагается использовать данные режимы разряда для создания точечных источников УФ-излучения с изменением спектра излучения в отдельных областях за счет различных материалов электродов.

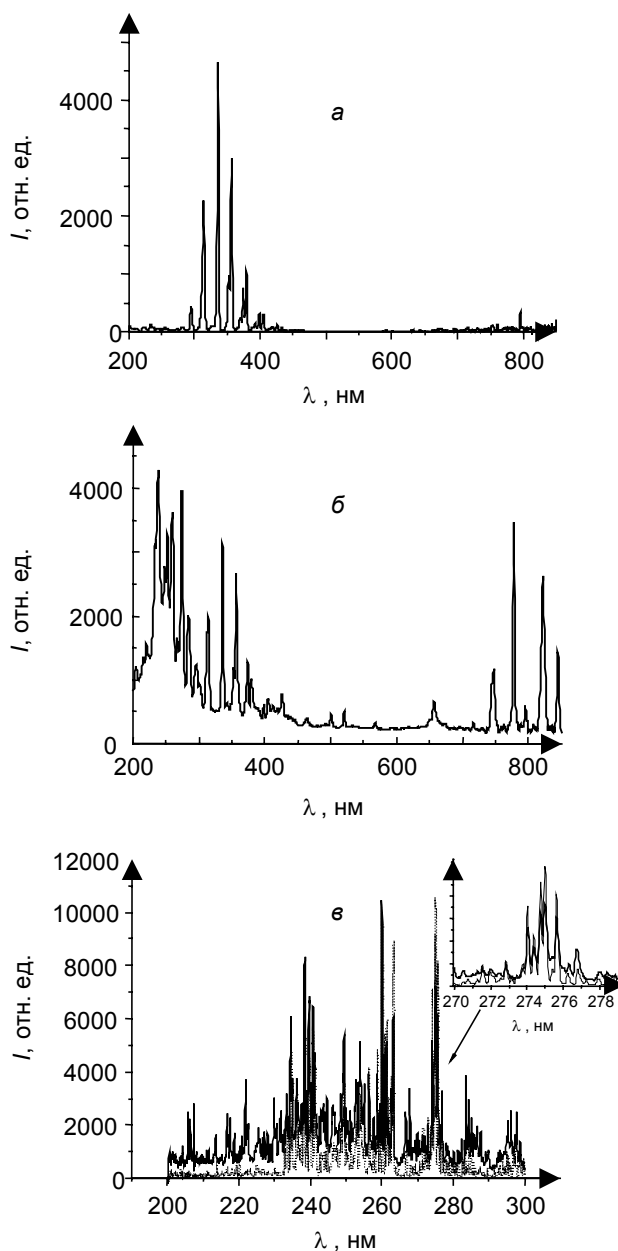


Рис. 2. Спектр излучения разряда для  $d = 2$  мм (*а*) и  $0,5$  мм (*б*) и спектр разряда для  $d = 0,5$  мм, снятый в более узком спектральном диапазоне с высоким разрешением (*в*), где пунктирной линии (и тонкой линии на вынесенном графике) соответствует дуговой спектр Fe

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протасов Ю.С. Плазменные источники излучения высокой спектральной яркости. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том IV. – М.: Наука, МАИК «НАУКА/ИНТЕРПЕРИОДИКА», 2000. – С. 232–262.
2. Book: Photo-Excited processes, Diagnostics and Applications / ed. by A. Peled. – The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 370 p.
3. Book: Photochemistry Research Progress / eds. by A. Sanchez, S.J. Gutierrez. – New York: Nova Science Publishers, 2008. – 556 p.
4. Erofeev M.V. and Tarasenko V.F. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2006. – V. 39. – P. 3609–3614.
5. Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В. и др. // Квантовая электроника. – 2007. – Т. 37. – № 6. – С. 595–596.
6. Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – № 4. – С. 401–403.
7. Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А. и др. // Опт. и спектр. – 2009. – Т. 107. – № 1. – С. 40–47.
8. Ерофеев М.В., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В. // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – № 6. – С. 561–564.
9. Бабич Л.П., Березин И.А., Лойко Т.В., Тарасов М.Д. // Изв. вузов. Радиофизика. – 1982. – Т. XXV. – № 10. – С. 1131–1137.

\*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 25.04.11.

\*\*Томский государственный университет систем управления

и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

Бакшт Евгений Хаимович, к.т.н., науч. сотр.;

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лаб. оптических излучений;

Шутько Юлия Васильевна, аспирантка;

Ерофеев Михаил Владимирович, к.ф.-м.н., науч. сотр.