

Точечный источник импульсно-периодического УФ излучения с малой длительностью импульса

Е.Х.Бакшт, В.Ф.Тарасенко, Ю.В.Шутько, М.В.Ерофеев

Исследовано излучение плазмы разряда при наносекундном пробое в неоднородном электрическом поле коротких межэлектродных промежутков. Использовались импульсы напряжения с амплитудой в падающей волне ~ 10 кВ, длительностью на полувывсоте ~ 1 нс и фронтом ~ 200 пс. Зафиксировано рентгеновское излучение из разрядного промежутка при межэлектродном зазоре 0.5 мм, что подтверждает генерацию убегающих электронов при формировании разряда. 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 режим, спектральный состав излучения.

1. Введение

Источники спонтанного излучения УФ и ВУФ диапазонов в настоящее время интенсивно исследуются и широко применяются в различных областях науки и техники [1–3]. Однако разработанные и выпускаемые промышленно приборы удовлетворяют не всем потребностям. Например, для калибровки спектральных приборов и оптических элементов необходимы точечные источники УФ и ВУФ излучения с объемом излучающей области ~ 1 мм³ и сравнительно большой импульсной мощностью излучения (более 1 Вт). Также представляют практический интерес источники с наносекундной длительностью импульса, работающие в импульсно-периодическом режиме.

Для создания импульсных источников с малой излучающей поверхностью наиболее часто применяют эксилампы барьерного разряда [4]. В таких источниках используется излучение от одного или нескольких диффузных микропрозрачных разрядов. В случае барьерного разряда его однородность при повышенных давлениях достигается путем установки на одном или обоих электродах диэлектрических барьеров, однако их применение увеличивает размеры области разрядной плазмы и ограничивает ток разряда. Последнее 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 использует-

ся объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин (ОРИПЭЛ) [5–7]. Такие источники позволяют при малых частотах следования импульсов получать их малые и большие (~ 1 МВт [5]) импульсные мощности излучения в ВУФ области спектра. Однако для формирования ОРИПЭЛ обычно используют импульсы напряжения с амплитудой свыше 100 кВ и межэлектродные промежутки 1 см и более.

В работе [8] показана возможность использования режима ОРИПЭЛ для создания миниатюрных источников, работающих при частоте следования импульсов до 1 кГц. Длительность импульса излучения 2⁺-системы азота при межэлектродном зазоре 2 мм в воздухе атмосферного давления составила ~ 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 импульсов напряжения субнаносекундной длительности с амплитудой ~ 14 кВ.

Целью настоящей работы является изучение излучательных характеристик наносекундного высоковольтного разряда с электродами малого радиуса кривизны и создание точечного короткоимпульсного источника УФ излучения с объемом излучающей плазмы менее 1 мм³, работающего в импульсно-периодическом режиме. Проведение данной работы стимулировали результаты спектральных исследований [8]. Было обнаружено (см. рис.5 в [8]), что при уменьшении межэлектродного зазора в области длин волн 200–230 нм появляется новая полоса с меньшей интенсивностью, чем у излучения 2⁺-системы азота.

2. Экспериментальная аппаратура и методики измерений

В экспериментах использовался генератор FPG-10 с амплитудой импульсов напряжения в передающей линии до 12.5 кВ. Данный вариант генератора по сравнению с использованным в [8] обеспечивал при работе на согласованную нагрузку большую длительность импульса напряжения на полувывсоте (~ 1 нс) при длительности фрон-

Е.Х.Бакшт. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Россия, 63405, Томск, просп. Ленина, 40; e-mail: VEN@loi.hcei.tsc.ru

В.Ф.Тарасенко, Ю.В.Шутько, М.В.Ерофеев. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

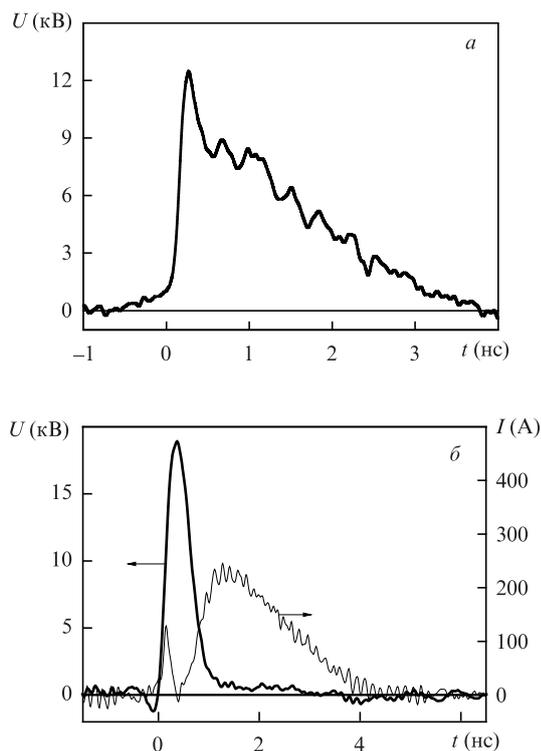


Рис.1. Осциллограмма падающей волны напряжения от генератора FPG-10 (а) и восстановленные импульсы напряжения на разрядном промежутке и тока через разрядный промежуток при межэлектродном зазоре $d = 0.5$ мм (б).

та ~ 0.2 нс на уровне 0.1–0.9 (рис.1,а). Генератор подключался к газоразрядному промежутку 50-омным кабелем длиной 1.3 м. Для измерения напряжения на разрядном промежутке и тока разряда (рис.1,б) вместо части кабеля к генератору подключалась передающая 50-омная линия с смонтированными в нее двумя емкостными делителями напряжения. Разряд формировался в воздухе атмосферного давления между двумя электродами, оканчивающимися острыми с малыми радиусами кривизны. Они были изготовлены из нержавеющей стали, алюминия, меди, титана, тантала и вольфрама. Electroдами из нержавеющей стали служили стандартные медицинские иглы с внешним диаметром 0.5 мм, остальные электроды выполнялись из фольг перечисленных материалов. Исследования проводились при зазорах 0.5, 1 и 2 мм и частотах следования импульсов от 370 до 1050 Гц.

Временной ход импульсов излучения регистрировался быстродействующим фотодиодом Photek PD025 Low Noise S20, расположенным на расстоянии ~ 2 см от источника излучения. Это расстояние достаточно для того, чтобы источник излучения с характерными размерами 2 мм и менее считать точечным [9]. В этом случае можно легко оценить энергию излучения в телесный угол 4π [10]. Спектры излучения разряда регистрировались спектрометрами EPP2000C-25 (StellarNet-Inc., рабочий диапазон 195–850 нм) и HR4000 (Ocean Optics B.V., 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, 25×10^9 выборок \cdot с $^{-1}$). Для регистрации рентгеновского излучения разряда использовался крупноблочный сцинтилляционный детектор на основе поли-

стирола с фотоумножителем XP 2020 Philips [11], а также фотопленка Kodak RAR film 2497, помещенная в непрозрачный для света и мягкого рентгеновского излучения конверт с окошком, закрытым бериллиевой фольгой толщиной 15 мкм (длинноволновый край пропускания соответствовал энергии рентгеновских квантов ~ 0.7 кэВ).

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В процессе экспериментов получены следующие результаты. При межэлектродном зазоре 2 мм формировался диффузный разряд (рис.2,а), который в случае сокращения расстояния между электродами становился искровым (рис.3,а), но при этом на первом этапе формирования разряда всегда присутствовала диффузная фаза. Это хорошо видно из сравнения рис.3,б и в, на которых представлены фотографии разряда, снятые в разные моменты времени с помощью CCD-камеры. По-видимому, диффузная фаза разряда соответствует ОРИПЭЛ.

Импульсы излучения для межэлектродных зазоров шириной $d = 2$ и 0.5 мм приведены на рис.2,б и 3,б соответственно. Длительность импульса излучения на полувысоте для зазора 2 мм составила ~ 3 нс, а для зазора 0.5 мм – около 70 нс. Столь большая длительность излучения для зазора 0.5 мм (по сравнению с длительностью импульса возбуждения с генератора FPG-10) объясняется тем, что импульсы напряжения частично отражались от нагрузки (разрядный промежуток), а затем от генератора, и снова попадали на разрядный промежуток. При этом отражение от нагрузки было существенно больше, чем при зазоре 2 мм, когда сопротивление нагрузки близко к сопротивлению передающей линии (кабеля).

Импульсы тока через разрядный промежуток и напряжения на разрядном промежутке, восстановленные из ос-

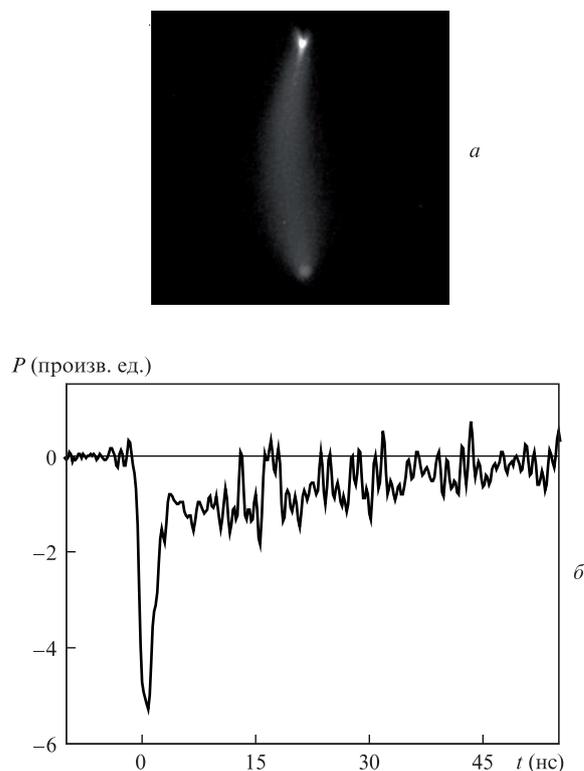


Рис.2. Интегральная фотография разряда, снятая за один импульс (а), и осциллограмма импульса излучения (б) при $d = 2$ мм.

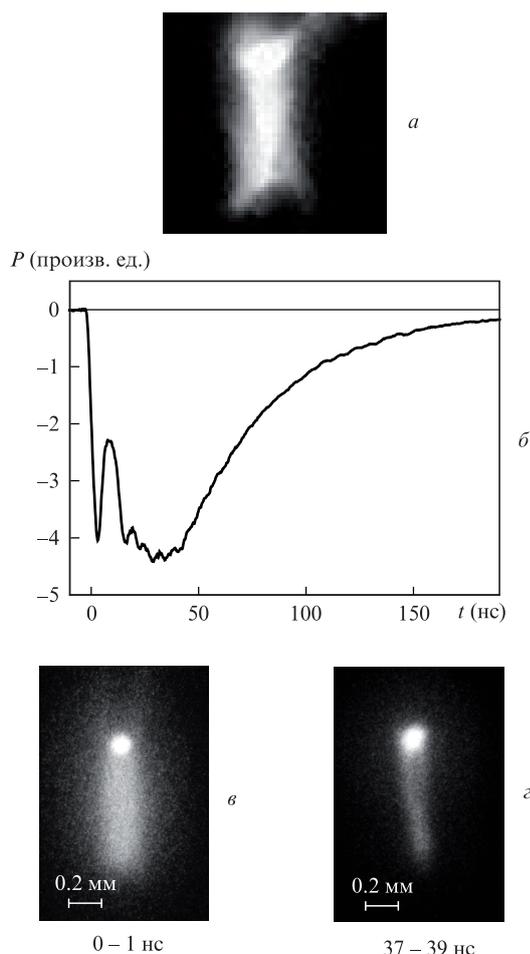


Рис.3. Интегральная фотография разряда, снятая за один импульс (а), осциллограмма импульса излучения (б) и снятые за один импульс в разные моменты времени фотографии разряда (в, з) при $d = 0.5$ мм.

циллограмм падающей и отраженной волн напряжения (с учетом реактивного сопротивления контура нагрузки), приведены на рис.1,б. Эти импульсы соответствуют приходу на промежуток импульса возбуждения с генератора FPG-10 (до прихода отражений) и, следовательно, первым наносекундам горения разряда, т.е. диффузной фазе (это следует из анализа фотографий, сделанных с помощью CCD-камеры). Первый импульс тока на рис.1,б – емкостный ток в контуре нагрузки.

В ходе экспериментов было обнаружено, что при зазоре 0.5 мм из разрядного промежутка распространяется слабое рентгеновское излучение. Оно было зафиксировано с помощью сцинтилляционного детектора и по отпечатку на фотопленке напротив окошка с бериллиевым фильтром. Наличие рентгеновского излучения из разрядного промежутка объясняется тормозным излучением убегающих электронов, возникающих на начальной стадии формирования разряда и обеспечивающих условия его диффузного горения.

Исследовался также спектральный состав излучения разряда для межэлектродных зазоров 2, 1 и 0.5 мм. При зазоре 2 мм в спектре излучения диффузного разряда, как и в работах [7, 8, 12], наблюдались в основном полосы второй положительной системы азота (рис.4,а). При переходе от зазора 2 мм к зазору 0.5 мм изменялся спектр разряда, в котором, помимо излучения полос 2^+ -системы

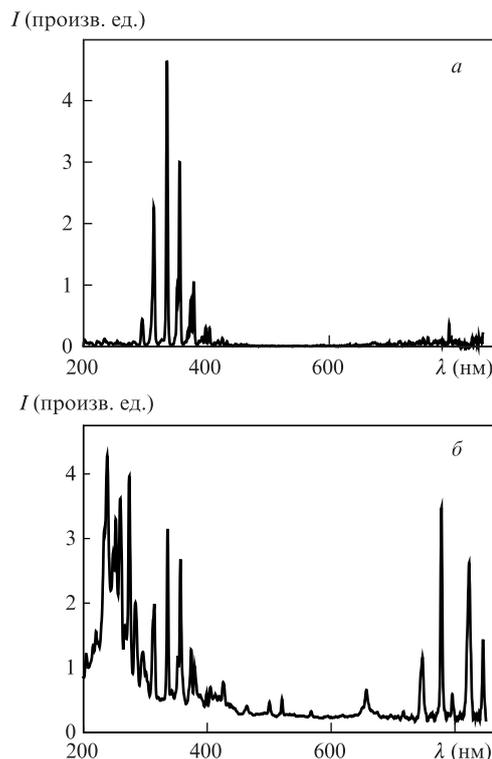


Рис.4. Спектры излучения разряда для межэлектродного зазора $d = 2$ мм (а) и $d = 0.5$ мм (б); электроды из нержавеющей стали.

азота, появлялось излучение континуума и возникали дополнительные спектральные линии (рис.4,б). При этом мощность излучения второй положительной системы азота практически не менялась, а мощность широкополосного излучения и линий металла существенно увеличивалась. Энергия излучения в области 200–300 нм составляла ~40% от энергии во всем исследуемом спектральном диапазоне (200–850 нм). На рис.5 вместе со спектром излучения искрового разряда ($d = 0.5$ мм), снятым с высоким разрешением, приведен также спектр излучения Fe в дуговом разряде. Наблюдается совпадение большинства линий в искровом спектре и линий спектра железа (для наглядности один из участков спектра увели-

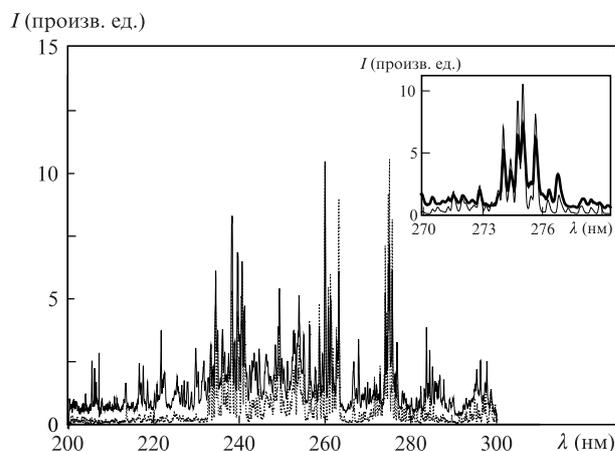


Рис.5. Спектр излучения разряда с электродами из нержавеющей стали, снятый с высоким разрешением в спектральном диапазоне 200–300 нм. Пунктирной кривой (на вставке – тонкой кривой) обозначен дуговой спектр Fe, $d = 0.5$ мм.

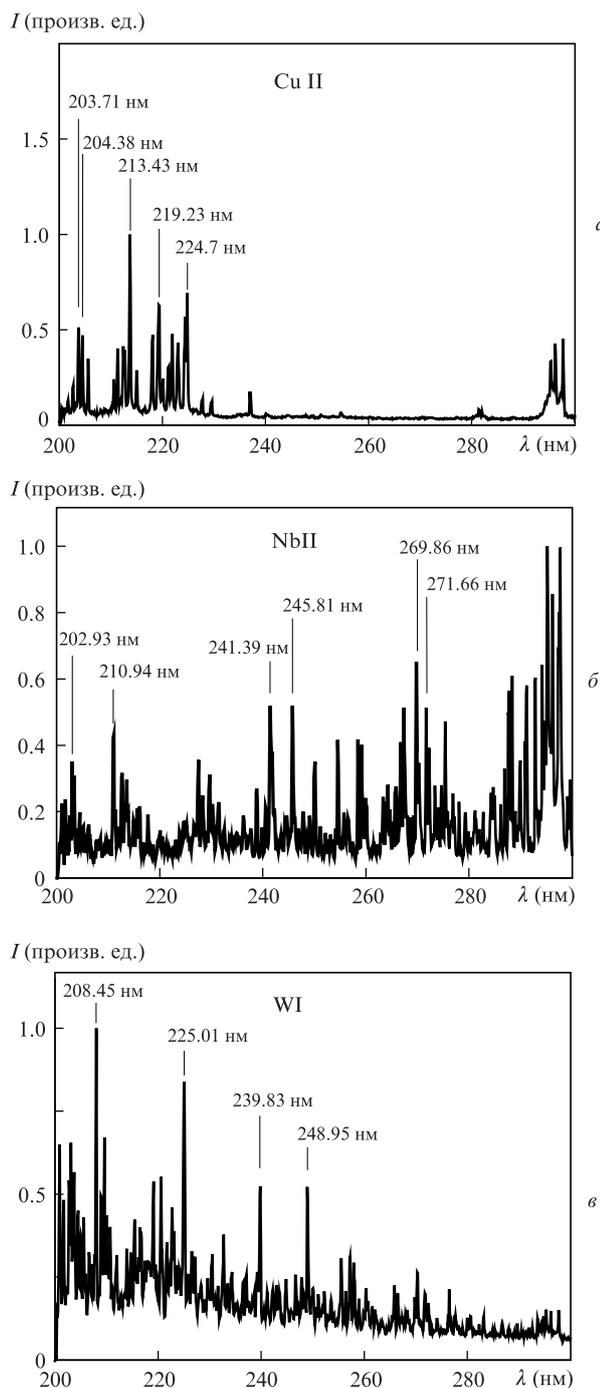


Рис.6. Спектры излучения разряда с электродами из меди (а), ниобия (б) и вольфрама (в), снятые с высоким разрешением в спектральном диапазоне 200–300 нм при $d = 0.5$ мм.

чен). 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 энер-

гии по сравнению с $d = 0.5$ мм, т. е. этот случай является промежуточным при переходе от от $d = 2$ мм к $d = 0.5$ мм.

При использовании электродов из других материалов наиболее интересные результаты получены с электродами из меди, ниобия и вольфрама. Эти спектры приведены на рис.6. Видно, что излучение разряда с электродами из перечисленных выше материалов содержит линии нейтральных атомов, а также линии ионов этих материалов.

4. Заключение

Таким образом, нами 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 присутствуют убегающие электроны, что проявляется в наличии рентгеновского излучения из разрядного промежутка и, как следствие, в предыонизации разрядного промежутка убегающими электронами и рентгеновским излучением, а также в наличии диффузной стадии разряда. Показано, что при пробое в этих условиях (0.5 мм) импульсами напряжения с амплитудой ~ 10 кВ 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 изменяющимся в отдельных областях спектром излучения в случае применения электродов из различных материалов.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт №02.740.11.0562).

1. Протасов Ю.С. *Плазменные источники излучения высокой спектральной яркости. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том IV* (М.: Наука, 2000, с. 232).
2. *Photo-Excited Processes, Diagnostics and Applications. Fundamentals and Advanced Topics*. Ed. by A. Peled (The Netherlands, Amsterdam: Kluwer Acad. Publ., 2003).
3. *Photochemistry Research Progress*. Ed. by A. Sanchez, S.J. Gutierrez (New York: Nova Sci. Publ., 2008).
4. Erofeev M.V., Tarasenko V.F. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **39**, 3609 (2006).
5. Ломаев М.И., Месяц Г.А., Рыбка Д.В. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 595 (2007).
6. Ерофеев М.В., Тарасенко В.Ф. *Квантовая электроника*, **38**, 401 (2008).
7. Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Сорокин Д.А. и др. *Оптика и спектроскопия*, **107**, 40 (2009).
8. Ерофеев М.В., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В. *Квантовая электроника*, **40**, 561 (2010).
9. *Справочная книга по светотехнике*. Под ред. Ю.Б. Айзенберга (М.: Энергоатомиздат, 1983).
10. Ломаев М.И., Рыбка Д.В. *ПТЭ*, №3, 111 (2006).
11. Дудкин Г.Н., Нечаев Б.А., Падалко В.Н. и др. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **53** (10-2), 60 (2010).
12. Бабич Л.П., Березин И.А., Лойко Т.В., Тарасов М.Д. *Изв. вузов. Сер. Радиофизика*, **25**, 1131 (1982).