

УДК 537.52; 537.523.3

*И.Д. КОСТЫРЯ\*, В.Ф. ТАРАСЕНКО\*\* \*\*, Д.В. РЫБКА\**

### ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ ПРОБОЕ ВОЗДУХА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСАМИ НАПРЯЖЕНИЯ С ФРОНТОМ 0.5 мкс<sup>1</sup>

Исследованы особенности генерации пучка убегающих электронов (ПУЭ) в воздухе атмосферного давления при большой (~ 500 нс) длительности фронта импульса напряжения. Установлено, что при высоких амплитудах напряжения на промежутке ( $U_m > 100$  кВ) и высокой средней напряженности электрического поля, что достигается при использовании катода с большим радиусом кривизны ( $R \geq 4.5$  мм), генерируется ПУЭ. При высоких  $U_m$  за анодом из алюминиевой фольги зарегистрирован сверхкороткий лавинный электронный пучок (с.л.э.п.) со сравнительно короткой длительностью импульса на полувывоте (до ~ 100 пс). Показано, что длительность импульса рентгеновского излучения при уменьшении амплитуды импульса напряжения генератора возрастает до ~ 100 нс на полувывоте. Установлено, что применение катода с малым радиусом кривизны уменьшает пробойное напряжение, что приводит к генерации убегающих электронов с меньшими энергиями и затрудняет регистрацию с.л.э.п.

**Ключевые слова:** микросекундный фронт импульса напряжения, пучок убегающих электронов, с.л.э.п., атмосферное давление воздуха.

#### Введение

Пучки убегающих электронов за анодом из фольги в газах повышенного давления наиболее легко зарегистрировать при подаче на промежуток с катодом, имеющим малый радиус кривизны, импульсов напряжения с субнаносекундным фронтом (см. обзоры [1, 2]). Впервые в газах атмосферного давления (гелий, дейтерий, воздух, аргон и ксенон) с помощью цилиндра Фарадея ПУЭ при использовании наносекундных импульсов высокого напряжения был зарегистрирован в 1974 г. [3]. При наносекундных импульсах высокого напряжения с.л.э.п. в воздухе атмосферного давления был также зарегистрирован при коронном разряде [4]. О прямой регистрации ПУЭ в воздухе атмосферного давления при микросекундном фронте импульса напряжения ранее сообщалось только в работах одной группы [5, 6]. В первой работе [5] сообщалось о получении  $10^7$  электронов за анодной фольгой толщиной 15 мкм. Фронт импульса напряжения равнялся 2.5 мкс, а пробойное напряжение на промежутке, согласно измерениям автора [5], составляло 70 кВ. Во второй работе [6] сообщалось о регистрации за фольгой из алюминия толщиной 6.5 мкм  $10^8$  электронов при длительности импульса тока пучка не более 0.8 нс. Измерения длительности импульса рентгеновского излучения в [5, 6] подтверждали короткую длительность импульса тока ПУЭ.

Цель данной работы – исследовать особенности генерации ПУЭ и рентгеновского излучения в воздухе атмосферного давления при фронте импульса напряжения в сотни наносекунд. Постановку данной задачи стимулировали предварительные результаты по генерации ПУЭ в воздухе атмосферного давления при фронте импульса напряжения в сотни наносекунд и более, полученные в лаборатории оптических излучений ИСЭ СО РАН, которые отличались от данных в работах [5, 6].

#### Экспериментальная аппаратура

На газовый диод подавались импульсы напряжения от генератора, подобного генератору СЛЭП-150 [7]. Отрезок коаксиальной высоковольтной линии заряжался от импульсного трансформатора, центральный проводник которого был соединен с катодом в газовом диоде. При этом обострительный разрядник, устанавливаемый в коаксиальной линии при обычной сборке генератора СЛЭП-150, был убран. Диаметр газового диода у фольги равнялся 54 мм. Во всех опытах газовый диод был заполнен атмосферным воздухом при давлении 0.1 МПа. Амплитуда импульсов напряжения холостого хода зависела от зарядного напряжения конденсатора в первичной обмотке импульсного трансформатора. На рис. 1 показан импульс напряжения в отсутствие пробоя промежутка.

<sup>1</sup> Работа поддержана РФФИ, грант № 12-08-00081\_а.

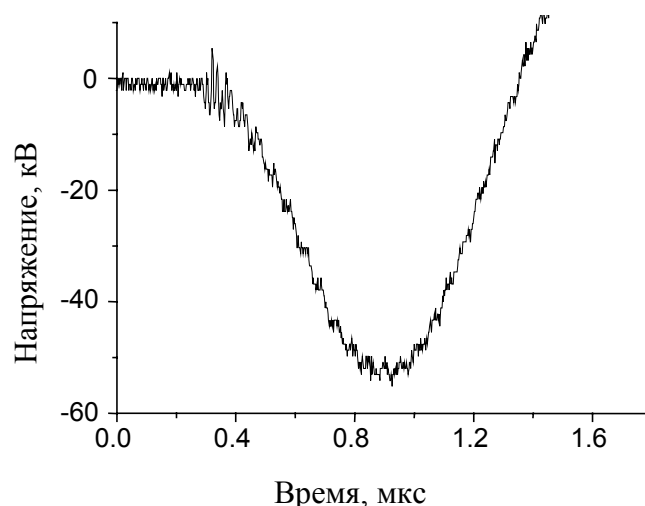


Рис. 1. Осциллограмма напряжения холостого хода генератора при убранным обострительном разряднике

Были испытаны три конструкции катода. Катодом № 1 служила трубка диаметром 6 мм из нержавеющей стали, изготовленная из фольги толщиной 100 мкм. Катод № 2 имел форму пули с диаметром цилиндрической части 6 мм, а катод № 3 имел форму шара диаметром 9.5 или 15 мм. Катоде № 2 и 3 также были изготовлены из нержавеющей стали. Анод был плоский и изготовлялся из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм или металлической сетки с прозрачностью 14 %. Кроме того, при регистрации рентгеновского излучения использовались аноды из медной фольги толщиной 20 мкм и алюминиевой фольги толщиной 100 мкм.

Напряжение пробоя промежутка зависело от зарядного напряжения конденсатора в первичном контуре импульсного трансформатора, конструкции катода и межэлектродного зазора. Эксперименты проводились в режиме однократных импульсов. Расстояние между анодной фольгой и катодом могло изменяться от 6 до 24 мм. Для регистрации с.л.э.п. за алюминиевой фольгой устанавливался коллектор. Сигнал с коллектора передавался с помощью коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом. Диаметр приёмной части коллектора, изготовленного из алюминия, равнялся 20 или 56 мм. Рентгеновское излучение регистрировалось с помощью ФЭУ-100 по люминесценции сцинтиллятора, установленного за анодом. Кроме того, для регистрации рентгеновского излучения применялась фотопленка РФ-3. Интегральное свечение разряда в газовом диоде фотографировалось фотокамерой Зенит-11. Временные характеристики излучения разряда определялись с помощью фотодиода ФЭК-22. Импульсы напряжения регистрировались емкостным делителем напряжения, а ток через разрядный промежуток – с помощью шунта. Электрические импульсы с делителя напряжения, коллектора, ФЭУ и шунта подавались на осциллограф TDS3034 (300 МГц, 2.5 выборки за наносекунду) или DPO70604 (6 ГГц, 25 выборок за наносекунду).

### Результаты и их обсуждение

При фронте импульса напряжения микросекундного диапазона напряжение пробоя промежутка по сравнению с импульсами с наносекундным фронтом уменьшается и сильно зависит от конструкции катода. Можно выделить два характерных режима пробоя промежутка в условиях данного эксперимента. При достижении амплитуд напряжения  $\sim 100$  кВ и более и длине промежутка  $\sim 20$  мм наблюдается быстрый спад напряжения на промежутке. В этом режиме регистрируется с.л.э.п. с субнаносекундной длительностью импульса. Данный режим генерации ПУЭ близок к режиму, наблюдаемому при наносекундных и субнаносекундных длительностях фронта импульса напряжения [1, 2].

Второй режим генерации ПУЭ и рентгеновского излучения иллюстрируют рис. 2 и 3. Осциллограммы напряжения на промежутке и рентгеновского излучения были получены для двух межэлектродных зазоров. Амплитуды напряжения на промежутке были менее 100 кВ. Видно, что при микросекундном фронте импульса напряжения и сравнительно малых напряжениях наблюдается

незавершенный пробой промежутка. При этом высокое напряжение на промежутке сохраняется во время нескольких сотен наносекунд. В данных условиях длительность импульса рентгеновского излучения на полувысоте достигает 100 нс, и также зависит от толщины и материала анодной фольги.

Из рис. 2, б и 3, б видно, что генерация рентгеновских квантов и, соответственно, убегающих электронов продолжается в течение сотен наносекунд. Однако энергия убегающих электронов сравнительно мала, что приводит к резкому сокращению длительности импульса рентгеновского излучения при замене алюминиевой фольги на медную фольгу толщиной 20 мкм или алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм. Зарегистрировать ПУЭ в этих условиях с помощью коллектора нам не удалось.

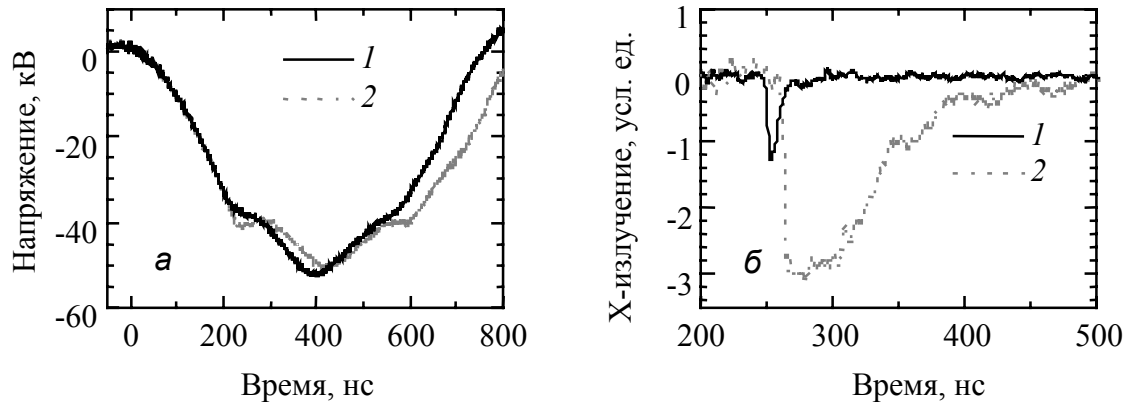


Рис. 2. Импульсы напряжения (а) и рентгеновского излучения (б), зарегистрированные с помощью ФЭУ-100 и сцинтиллятора за фольгой из алюминия толщиной 10 мкм (пунктир 2) и за фольгой из меди толщиной 20 мкм (сплошная линия 1). Катод № 2, межэлектродный зазор 24 мм

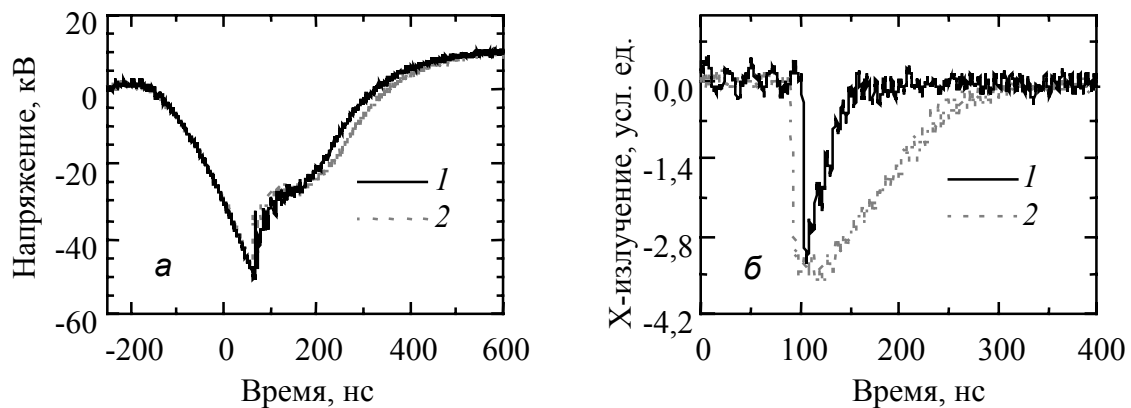


Рис. 3. Импульсы напряжения (а) и рентгеновского излучения (б), зарегистрированные с помощью ФЭУ-100 и сцинтиллятора за фольгой из алюминия толщиной 10 мкм (пунктир 2) и за фольгой из меди толщиной 20 мкм (сплошная линия 1). Катод № 2, межэлектродный зазор 12 мм

Осциллограммы тока через промежуток и излучения из промежутка также подтверждают, что при микросекундном фронте импульсов напряжения с амплитудой менее 100 кВ наблюдается незавершенный пробой промежутка. При первичном пробое регистрируется пик тока с длительностью  $\sim 10$  нс и пик на осциллограмме излучения. Далее величина тока через промежуток и мощность излучения из промежутка существенно уменьшаются. В ряде импульсов регистрировались два пика на осциллограмме тока разряда и соответственно на импульсе излучения. Задержка между ними обычно составляла около 100 нс. Отметим, что на фотографии интегрального излучения из промежутка видна яркая искра. Однако большая длительность импульса рентгеновского излучения и сохранение высокого напряжения на промежутке свидетельствует о том, что вначале формируется диффузный разряд, который затем контрагируется.

### Заключение

Проведенные исследования подтвердили возможность генерации пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения при большой длительности фронта импульса напряжения ( $\sim 1$  мкс). При высоких напряжениях на промежутке, которые достигались при использовании катода с большим радиусом кривизны ( $R \geq 4.5$  мм), был зарегистрирован с.л.э.п. Однако результаты, полученные в данной работе, отличаются от результатов работ [5, 6]. Во-первых, при напряжении пробоя промежутка 70 кВ в отличие от работы [5] ток пучка убегающих электронов за алюминиевой фольгой толщиной 10 мкм и более не регистрировался. Во-вторых, длительности импульсов рентгеновского излучения достигали при тонких анодных фольгах 100 нс и зависели от конструкции катода и напряжения пробоя промежутка.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V. // *Plasma Devices and Operation*. – 2008. – V. 16. – No. 4. – P. 267–298.
2. Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F. // *International Review of Physics (I.R.E.PHY.)*. – 2012. – V. 6. – No. 2. – P. 165–195.
3. Tarasova L.V., Khudyakova L.N., Loiko T.V., Tsukerman V.A. // *Soviet Physics Technical Physics*. – 1974. – V. 19. – P. 351–355.
4. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Jan P., Kozyrev A.V., Baksht E.Kh. // *J. Appl. Phys.* – 2012. – V. 111. – No. 2. – P. 023304.
5. Loiko T.V. // *Soviet Physics Technical Physics*. – 1980. – V. 25. – P. 232–234.
6. Babich L.P., Loiko T.V. // *Doklady Physics. MAIK Nauka/Interperiodica*. – 2009. – V. 54. – No. 11. – P. 479–482.
7. Kostyrya I.D., Rybka D.V., Tarasenko V.F. // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2012. – V. 55. – No. 1. – P. 72–77.

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

Поступила в редакцию 01.10.14.

\*\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,

г. Томск, Россия

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

Костыря Игорь Дмитриевич, ведущ. инженер лаб. оптических излучений;

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., зав. лаб. оптических излучений ИСЭ, профессор каф. квантовой электроники и фотоники ТГУ;

Рыбка Дмитрий Владимирович, науч. сотр. лаб. оптических излучений.

I.D. KOSTYRYA, V.F. TARASENKO, D.V. RYBKA

**RUNAWAY ELECTRONS DURING BREAKDOWN UNDER VOLTAGE PULSES WITH RISE TIME 0.5 MICROSECOND**

The beams of runaway electrons and X-rays during the discharges in the air of the atmospheric pressure are registered in many scientific groups, see reviews [1, 2] and references therein. In these experiments the nanosecond voltage pulses with and subnanosecond rise times were used. In this paper we investigated the generation of runaway electrons and X-rays in the air at atmospheric pressure with rise time of voltage pulses 0.5  $\mu\text{s}$ . The runaway electron beam was recorded using the collector. Also the runaway electrons and X-rays were registered with the scintillator and FEU-100, and on film RF-2. The pulse duration from collector was shorter than from FEU-100.

**Keywords:** *microsecond front of the voltage pulse, the runaway electron beam, c. l. e. p., atmospheric air pressure.*

## REFERENCES

1. Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V. (2008). *Plasma Devices and Operation*, 16(4), 267–298.
2. Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F. (2012). *International Review of Physics (I.R.E.PHY.)*, 6(2), 165–195.
3. Tarasova L.V., Khudyakova L.N., Loiko T.V., Tsukerman V.A. (1974). *Soviet Physics Technical Physics*, 19, 351–355.
4. Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Lomaev M.I., Sorokin D.A., Jan P., Kozyrev A.V., Baksht E.Kh. (2012). *J. Appl. Phys.*, 111(2), 023304.
5. Loiko T.V. (1980). *Soviet Physics Technical Physics*, 25, 232–234.
6. Babich L.P., Loiko T.V. (2009). *Doklady Physics. MAIK Nauka/Interperiodica*, 54(11), 479–482.
7. Kostyrya I.D., Rybka D.V., Tarasenko V.F. (2012). *Instruments and Experimental Techniques*, 55(1), 72–77.