

УДК 537.5

*Д.В. БЕЛОПЛОТОВ***, И.Д. КОСТЫРЯ*, В.Ф. ТАРАСЕНКО******УБЕГАЮЩИЕ ЭЛЕКТРОНЫ ЗА СЕТЧАТЫМ КАТОДОМ ПРИ СУБНАНОСЕКУНДНОМ РАЗРЯДЕ В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ¹**

Исследованы условия появления убегающих электронов в воздухе атмосферного давления за сетчатым катодом и алюминиевой фольгой в направлении, противоположном от плоского анода. На промежуток подавались импульсы высокого напряжения от генератора СЛЭП-150 с амплитудой ~ 140 кВ длительностью на полувысоте 1 нс и фронтом 0.3 нс. Подтверждено, что при использовании сетчатых катодов различной прозрачности и дополнительной фольги, установленной на расстоянии 3 мм и более от сетки, регистрируется пучок убегающих электронов с противоположной от анода стороны. Установлено, что ток пучка в обратном от анода направлении и рентгеновское излучение из газового диода по-разному зависят от межэлектродного зазора. Рассчитаны напряженности электрического поля в промежутке и за сетчатым катодом. Показано, что на поверхности проволоки сетки, обратной от катода, достигаются напряженности электрического поля, достаточные для генерации убегающих электронов. Зарегистрированы средние экспозиционные дозы рентгеновского излучения за импульс до 3.5 мРн.

Ключевые слова: убегающие электроны в направлении, обратном от анода, пучок и рентгеновское излучение в воздухе атмосферного давления, субнаносекундная длительность импульса.

Диффузные (объемные) разряды, формируемые в неоднородном электрическом поле при наносекундном и субнаносекундном пробое воздуха атмосферного давления и других газов, последние годы привлекают большое внимание (см., например, [1] и ссылки там). В неоднородном электрическом поле диффузный характер разрядов определяется генерацией убегающих электронов (УЭ) и рентгеновского излучения (РИ). В работе [2] было предложено называть данный режим разрядов высокого давления ОРИПЭЛ (объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин). Во время изучения свойств ОРИПЭЛ в воздухе атмосферного давления в работе [3], при подаче на плоский анод импульсов напряжения с амплитудой порядка 200 кВ, был получен неожиданный результат. Поток быстрых электронов был зарегистрирован за сетчатым катодом в противоположном от анода направлении. Анализ литературы показал, что подобное явление ранее наблюдалось только при низких давлениях гелия и неона [4]. Давление газов в [4] было менее 100 Торр, а амплитуда импульса напряжения, подаваемого на сетчатые электроды, составляла несколько киловольт.

Исследования, проведенные в [3], а также в [5–7], в том числе при пикосекундном временном разрешении, показали, что на амплитуду регистрируемого за катодом тока быстрых электронов существенно влияет материал анода. Было установлено, что в разряде с анодом из алюминия длительность импульса тока электронов за катодом больше, чем в такой же конструкции газового диода с танталовым анодом, а амплитуда пучков убегающих электронов в обратном (ПУЭО) от анода направлении меньше. Отметим, что исследования ПУЭО при атмосферном давлении воздуха и других газов другими научными группами не проводились, и для понимания механизма генерации пучка убегающих электронов в направлении, противоположном от анода, требовались дополнительные исследования.

Цель настоящей работы – экспериментально исследовать генерацию пучков убегающих электронов в обратном от анода направлении, рассчитать напряженности электрического поля в разрядном промежутке и за катодом и предложить механизм генерации ПУЭО.

В экспериментах использовался генератор СЛЭП-150 со специально разработанным газовым диодом [5–7] (рис. 1, а). Для получения ПУЭО на высоковольтный электрод газового диода подавался импульс напряжения U положительной полярности. Амплитуда U в падающей волне составляла ~ 140 кВ, а длительность импульса на полувысоте 1 нс. Длительность фронта импульса напряжения определяется обострителем разрядником и равнялась 0.3 нс. Анод газового диода 4 диаметром 36 мм был изготовлен в виде плоского диска толщиной 3 мм с закругленными краями.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

Поверхность анода, обращенная к катоду, была выполнена из Al, нержавеющей стали или из Ta. Катод 7 был изготовлен в виде сетки из параллельных стальных проволок диаметром 0.2 мм с шагом 4 или 8 мм, натянутых на плоском стальном кольце (5), толщина которого равнялась 3 мм. Отверстие в центре кольца имело диаметр 62 мм. Кольцо крепилось к фланцу газонаполненного диода. Также в качестве катода использовались плетеные сетки из проволоки диаметром 0.24 и 0.23 мм с размерами ячеек 1×1 и 0.5×0.5 мм соответственно. С другой стороны кольца устанавливалась алюминиевая фольга 8, за которой располагались коллекторы для регистрации электронов с различными диаметрами приемной части. Фольга имела толщину 10 мкм и крепилась к фланцу газового диода. Расстояние между сеткой и фольгой l равнялось 3 мм. За счет дополнительных колец 5 l могло увеличиваться до 6, 9 и 12 мм. Межэлектродный зазор d мог изменяться от 1 до 10 мм. При использовании свежизготовленных катодов и анодов перед проведением измерений каждый из электродов тренировался в течение нескольких десятков импульсов.

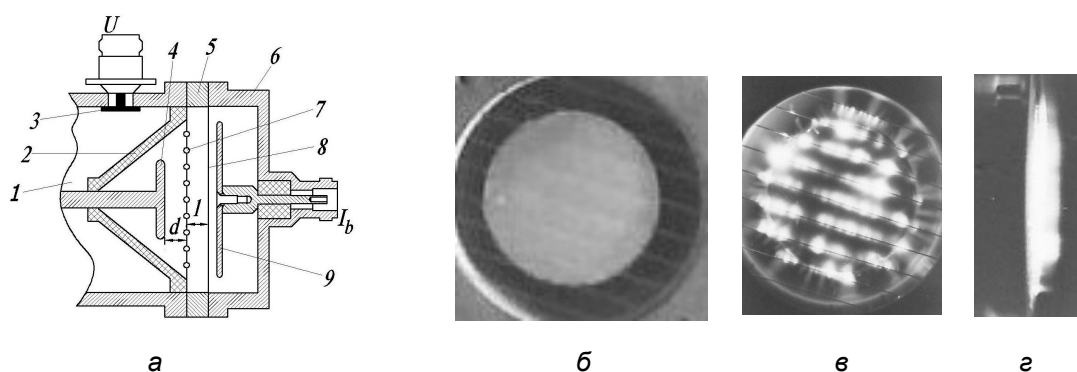


Рис. 1. Конструкция газового диода, подключенного к генератору СЛЭП-150 (а): 1 – коаксиальная передающая линия генератора, 2 – изолятор газового диода, 3 – емкостной делитель напряжения, 4 – анод в виде диска, 5 – металлическое кольцо, 6 – корпус коллектора, 7 – сетка, 8 – фольга, 9 – приёмная часть коллектора диаметром 56 мм. Фотографии газового диода без коллектора, металлического кольца и фольги со стороны сетки-катода (б, в) и сбоку (г) без разрядной плазмы (б) и с плазмой (в, г) за один импульс. Расстояние между проволоками 4 мм

В данной работе были повторены все эксперименты по регистрации ПУЭО и РИ, описанные в работах [3, 5–7] с анодом из тантала и алюминия. Кроме того, были проведены эксперименты с анодом из нержавеющей стали, катодами из сеток другой конструкции и прозрачности, а также был существенно расширен диапазон и число измеряемых параметров. Измерения ПУЭО и РИ проводились при положительной полярности генератора СЛЭП-150. Дополнительно, в ряде экспериментов полярность генератора изменялась на отрицательную, плоский анод (при положительной полярности) заменялся на сетчатый катод и сетка-катод (при положительной полярности) заменялась на алюминиевую фольгу, которая после смены полярности генератора становилась анодом. В этих условиях в газовом диоде генерировался сверхкороткий лавинный электронный пучок (СЛЭП) [2, 8], который также измерялся с помощью коллектора. Для записи электрических сигналов использовались цифровые осциллографы реального времени, в том числе LeCroy WaveMaster 830Zi-A с полосой пропускания до 30 ГГц и с шагом дискретизации 12.5 пс. Экспозиционная доза рентгеновского излучения определялась с помощью дозиметра Argow-Tech, Inc (Model 138). Автографы пучка электронов и рентгеновского излучения регистрировались на фотопленке РФ-3.

Проведенные исследования подтвердили результаты, которые были получены в предыдущих работах [3, 5–7]. ПУЭО стабильно регистрировался за катодной сеткой в направлении, противоположном от анода. Число электронов в ПУЭО возрастало с увеличением атомного номера металла, из которого был изготовлен плоский анод, а длительность импульса тока пучка при этом уменьшалась.

На рис. 2 приведены зависимости числа электронов в ПУЭО и экспозиционные дозы рентгеновского излучения от межэлектродного зазора для различных материалов анода, полученные в данной работе. На зависимости числа электронов в ПУЭО для всех анодов имеется оптимальный межэлектродный промежуток, который оказался наименьшим для анода из алюминия. Число электронов в ПУЭО с анодом из нержавеющей стали было больше, чем с анодом из алюминия, но меньше, чем с анодом из тантала. Это соответствует соотношению атомных номеров для этих ма-

териалов. Наибольшие амплитуды ПУЭО регистрировались при расстоянии между проволоками 4 мм. Оптимальный межэлектродный зазор для получения наибольшей экспозиционной дозы рентгеновского излучения, наоборот, оказался наибольшим при аноде из алюминия.

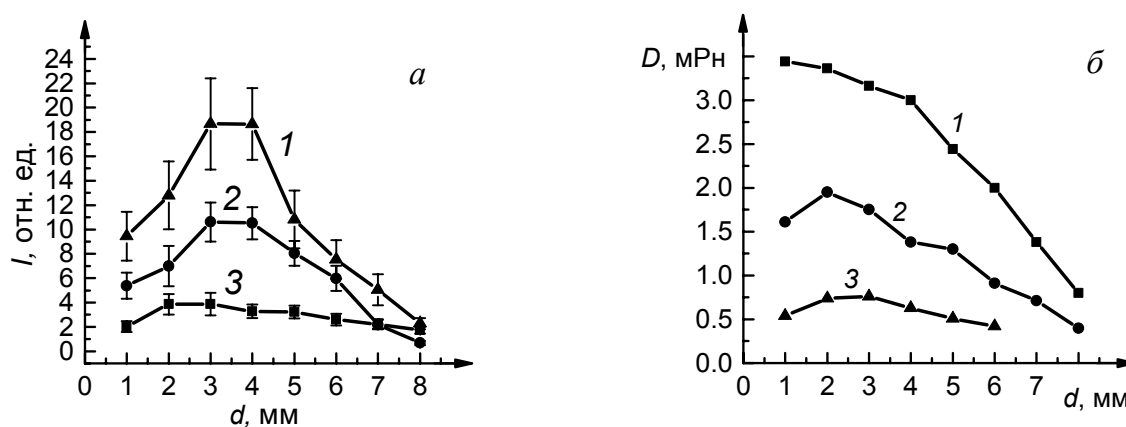


Рис. 2. Зависимости числа электронов в ПУЭО (а) и экспозиционной дозы рентгеновского излучения (б) от межэлектродного зазора для анода из тантала (кр. 1), нержавеющей стали (кр. 2) и алюминия (кр. 3) при разряде в воздухе атмосферного давления

Фотографии газового диода со стороны сетки-катода без разрядной плазмы и с разрядной плазмой со стороны сетки (б, в) и сбоку (г) приведены на рис. 1. Снимки интегрального свечения разрядной плазмы сделаны без дополнительной фольги δ (см. рис. 1, а). Видно, что свечение плазмы наблюдается у проволок, из которых сделан катод (рис. 1, в) и выходит в направлении, противоположном от анода за плоскость, в которой размещены проволоки, на расстояние до 10 мм (рис. 1, г). Таким образом, при данной конструкции газового диода и полярности импульса напряжения происходит распространение разрядной плазмы не только по направлению к аноду, но и в противоположном от него направлении. Для такого развития разряда необходимо появления электрического поля в пространстве за сеткой.

Для выяснения этого вопроса были проведены расчеты распределения напряженности электрического поля в промежутке вдоль линии, проходящей вблизи оси симметрии промежутка. Моделирование было проведено с помощью программы ELCUT 5.1 Professional [9]. Результаты расчетов показаны на рис. 3.

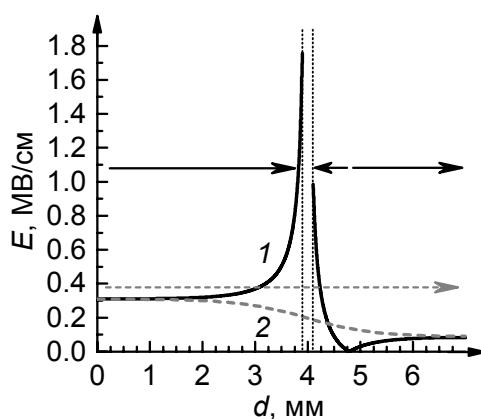


Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля между потенциальным электродом-анодом (слева) и заземлённой фольгой (справа) вдоль линии, проходящей через проволоку (кр. 1) и между проволоками (кр. 2) вблизи оси симметрии промежутка. Вертикальными пунктирными линиями обозначены границы проволоки. Стрелками указано направление вектора напряженности электрического поля. Межэлектродный зазор и расстояние между проволоками 4 мм

Из расчетов следует, что максимальная напряженность электрического поля наблюдается у поверхности проволоки и превышает 1 МВ/см. Наличие столь высокой напряженности электрического поля объясняет появление первых электронов у катода, на противоположной от анода сто-

роне проволоки (между сеткой и фольгой) и переход части электронов в режим убегания. Наличие поля между сеткой и фольгой обеспечивает генерацию убегающих электронов и формирование волны ионизации, фронт которой движется в направлении, противоположном от анода. Свечение этой плазмы хорошо видно на рис. 1, 2. Также интенсивное излучение плазмы ОРИПЭЛ наблюдается в промежутке между сетчатым катодом и плоским анодом.

Зарегистрировать СЛЭП при потенциальном аноде технически очень сложно. Однако при смене полярности генератора СЛЭП–150, замене плоского потенциального анода на сетчатый катод, а также катода из сетки на алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм, которая после смены полярности генератора становилась анодом, СЛЭП был получен. Его амплитуда достигала 100 А при длительности импульса на полувысоте около 100 пс [10].

Как следует из рис. 2, числа электронов в ПУЭО и экспозиционные дозы РИ существенно зависят от материала анода. При использовании анода из металла с большим атомным номером число электронов в ПУЭО и экспозиционная доза РИ возрастают. Возрастание экспозиционной дозы объясняется увеличением интенсивности тормозного рентгеновского излучения, генерируемого за счет убегающих электронов, ускоренных между сетчатым катодом и анодом, при использовании анода с большим атомным номером. Мы предполагаем, что рост числа электронов в ПУЭО, при использовании анода с большим атомным номером, обусловлен участием тормозного РИ в формировании волны ионизации, фронт которой движется в направлении от анода. По-видимому, РИ с анода оказывает существенное влияние на продвижение волны ионизации в направлении фольги. Согласно результатам наших работ [1–3, 10], основное число убегающих электронов при субнаносекундном фронте импульса напряжения генерируется за счет усиления электрического поля у поляризованного фронта волны ионизации.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили, что при использовании сетчатого катода пучок убегающих электронов генерируется не только в направлении анода и боковых стенок газового диода, но и в направлении, противоположном от анода. Генерация убегающих электронов в противоположном направлении от анода обусловлена проникновением электрического поля за редкую сетку и распространением плотной плазмы, формируемой за счет усиления электрического поля у сетчатого катода из проволок с малым радиусом кривизны, и предыонизации РИ области перед фронтом плотной плазмы в направлении от анода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / ed. V. F. Tarasenko. New York, Nova Science Publishers, Inc., 2014, 598 p.
2. Тарасенко В. Ф., Орловский В. М., Шунайлов С. А. // Изв. вузов. Физика. – 2003. – Т. 45. – № 3. – С. 94–95.
3. Tarasenko V. F., Baksht E. Kh., Burachenko A. G., et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. – 2010. – V. 38. – No. 4. – P. 741–750.
4. Бохан П. А., Сорокин А. Р. // ЖТФ. – 1985. – Т. 55. – Вып. 6. – С. 1168–1170.
5. Костыря И. Д., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 12. – С. 107–109.
6. Baksht E. Kh., Kozyrev A. V., Kostyrya I. D., et al. // High Voltage Engineering. – 2013. – V. 39. – No. 9. – P. 2138–2144.
7. Tarasenko V. F., Baksht E. K., Erofeev M. V., et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. – 2013. – V. 41. – No. 10. – P. 2931–2940.
8. Тарасенко В. Ф. // Физика плазмы. – 2011. – Т. 37. – № 5. – С. 444–457.
9. http://elcut.ru/allnews/elcut51_r.htm.
10. Костыря И. Д., Рыбка Д. В., Тарасенко В. Ф. // ПТЭ. – 2012. – № 1. – С. 80–85.

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

Поступила в редакцию 03.08.15.

**Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

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

Белоплов Дмитрий Викторович, мл. науч. сотр., аспирант;

Костыря Игорь Дмитриевич, ведущ. инженер;

Тарасенко Виктор Федотович, д.ф.-м.н., профессор, зав. лабораторией.

D.V. BELOPLOTOV*,**, I.D. KOSTYRYA*, V.F. TARASENKO*,**

HIGH ENERGY ELECTRONS BEHIND THE PLANE-GRID CATHODE AT SUBNANOSECOND DISCHARGE IN ATMOSPHERIC PRESSURE AIR

In this work, the experiments was performed for examination of the conditions under which a runaway electron beam moves not only toward the anode but also backward (to the space downstream of the cathode). Furthermore, simulation of electric field distribution in “anode – grid cathode” and “anode – grid cathode – foil” gap was carried out.

In the experiments, a SLEP-150 generator was used which allowed us to obtain $6 \cdot 10^{10}$ electrons in atmospheric pressure air downstream of an Al foil anode 10 μm thick. For recording a backward runaway electron beam, a positive voltage pulse was applied to the high-voltage electrode of the gas diode. The amplitude of the voltage pulse in the incident wave was ~ 140 kV and its FWHM was 1 ns. The voltage pulse rise time was determined by a peaking switch and was 0.3 ps. The anode of the gas diode was 36 mm in diameter and was a flat disk 3 mm thick with rounded edges. The anode surface facing the cathode was made of aluminum, stainless steel or tantalum. The cathode was a grid of parallel $\varnothing 0.2$ -mm stainless steel wires stretched with a step of 4 or 8 mm on a flat steel ring 3 mm thick. On the other side of the ring, there was an Al foil reinforced with a grid of transparency 90 %. The electron beam was recorded by collectors of varying receiving part diameter located downstream of the 10- μm foil which was also fixed to the flange of the gas diode. The spacing between the grid and the foil was 3 mm and could be increased to 6, 9, and 12 mm using additional rings. With diaphragms, the pulse width of the backward runaway electron beam was measured at picosecond and subnanosecond time resolution. In the first case, the diameter of the collector receiving part was 3 mm and the time resolution was ~ 20 ps.

When recording the electron beam in the forward direction, the generator polarity was reversed. The potential electrode was a cathode in the form of $\varnothing 0.2$ -mm parallel stainless wires stretched with a step of 4 mm on a $\varnothing 40$ -mm steel ring fixed to a flat disk. The anode, in this case, was a 10 μm thick Al foil. Aluminum foil filters of differing thickness made it possible to determine the electron beam attenuation.

On the bases of the conducted experiments and simulation, the following conclusions can be made:

1. Recording of fast electrons behind the cathode foil of the discharge gap containing inside the thin wires under the cathode potential indicates that these fast electrons are generated near the wire surfaces where electric field has its maximum strength. Simulation of electric field distribution have shown, that an electric field strength is reached $\sim 10^6$ V/cm around wires.

2. Short current pulse of the fast electrons indicates that they are formed in the initial stage of the breakdown and they are not the dissipated electrons, which have got beyond the cathode after the anode voltage drop.

3. Dependence of the total number of fast electrons on the anode material indicates that the bremsstrahlung X-radiation is of great importance already at the initial stage of the breakdown development when runaway electrons are formed.

Keywords: backward runaway electron beams, e-beam in atmospheric pressure air, subnanosecond pulse duration.

REFERENCES

1. Tarasenko V.F. (ed.). Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges. New York, Nova Science Publishers, Inc., 2014.
2. Tarasenko V. F., Orlovskii V. M., Shunailov S. A. (2003). Forming of an electron beam and a volume discharge in air at atmospheric pressure. *Russian Physics Journal*, 46(3), 325–327.
3. Tarasenko V. F., Baksht E. K., Burachenko A. G., Kostyrya I. D., Lomaev M. I., Rybka D. V. Supershort avalanche electron beams and x-rays in atmospheric-pressure air. (2010). *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(4), 741–750.
4. Bokhan P. A., Sorokin A. P. (1985). Formation electron beams in recharging layer during discharge in gases of average pressures. *Technical Physics*, 55(6), 1168–1170. (in Russian)
5. Kostyrya I. D., Rybka D. V., Tarasenko V. F., Kozyrev A. V., Baksht E. Kh. (2013). Occurrence of runaway electrons behind the cathode under subnanosecond breakdown of air at atmospheric pressure. *Russian Physics Journal*, 55(12), 1493–1496.
6. Baksht E. Kh., Kozyrev A. V., Kostyrya I. D., Rybka D. V., Tarasenko V. F. (2013). Fast electrons behind the plane-grid cathode at nanosecond discharge in atmospheric pressure air. *High Voltage Engineering*, 39(9), 2138–2144.
7. Tarasenko V. F., Baksht E. K., Erofeev M. V., Kostyrya I. D., Rybka D. V., Shutko Y. V. (2013). New features of the generation of runaway electrons in nanosecond discharges in different gases. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 41(10), 2931–2940.
8. Tarasenko V. F. (2011). Parameters of a supershort avalanche electron beam generated in atmospheric-pressure air. *Plasma Physics Reports*, 37(5), 409–421.
9. http://elcut.ru/allnews/elcut51_r.htm.
10. Kostyrya I.D., Rybka D.V., Tarasenko V.F. (2012). The amplitude and current pulse duration of a supershort avalanche electron beam in air at atmospheric pressure. *Instruments and Experimental Techniques*, 55(1), 72–77.