

СВЕРХКОРОТКИЙ ЛАВИННЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК, ГЕНЕРИРУЕМЫЙ В НЕОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

SUPERSHORT AVALANCHE ELECTRON BEAM GENERATED IN NONUNIFORM ELECTRIC FIELD

*В. Ф. Тарасенко, Е. Х. Бакиит, Д. В. Белоплотов, А. Г. Бураченко, М. И. Ломаев
V. F. Tarasenko, E. Kh. Bakshyt, D. V. Beloplotov, A. G. Burachenko, M. I. Lomaev*

Институт сильноточной электроники СО РАН
Institute of High Current Electronics SB RAS

Представлены результаты экспериментальных исследований амплитудно-временных характеристик сверхкороткого лавинного электронного пучка (СЛЭП), напряжения пробоя и тока разряда, полученных с пикосекундным временным разрешением.

Results of experimental studies of the amplitude-temporal characteristics of a supershort avalanche electron beam (SAEB) with a picosecond time resolution are presented.

Введение

В 2016 году исполняется 50 лет работе [1], в которой по рентгеновскому излучению в гелии атмосферного давления был установлен факт генерации пучка убегающих электронов (ПУЭ) при пробое промежутка с неоднородным распределением поля. Результаты этой работы экспериментально доказали идею профессора Вильсона [2] о возможности ускорения электронов в газах в условиях высокого электрического поля. Рентгеновское излучение при импульсном разряде в воздухе атмосферного давления было впервые зарегистрировано в работе [3], а ПУЭ в работах [4, 5].

Генерация убегающих электронов в газах повышенного давления является фундаментальным физическим явлением. К настоящему времени опубликованы сотни статей, посвященных исследованиям пучков убегающих электронов и рентгеновского излучения при лабораторных разрядах в газах атмосферного давления, см. монографию [6], коллективные монографии [7, 8], обзор [9] и ссылки в них. Однако, результаты исследований различных научных групп существенно отличаются.

Цель данной работы – провести с пикосекундным временным разрешением подробные экспериментальные исследования амплитудно-временных параметров разряда и пучков убегающих электронов, которые генерируются при субнаносекундном пробое газов атмосферного давления.

1. Экспериментальная аппаратура и методики

Исследование параметров ПУЭ проводилось на установках, состоящих из генераторов СЛЭП-150, СЛЭП-150М, РАДАН-220, разрядных камер и системы регистрации.

На рис. 1а показана конструкция выходной части генератора РАДАН-220 с газовым диодом, шунтом и коллектором.

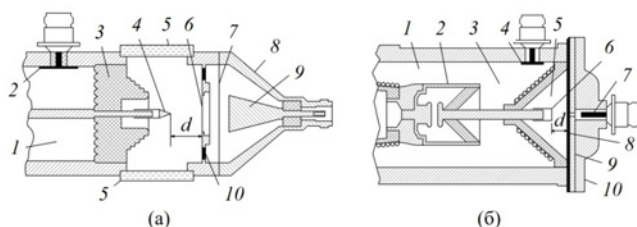


Рис. 1. а – конструкция выходной части генератора РАДАН-220 с газовым диодом, шунтом и коллектором: 1 – передающая линия генератора, 2 – емкостный делитель, 3 – изолятор, 4 – конусный катод, 5 – окна из кварца, 6 – анод из фольги или сетки, 7 – Al фольга, 8 – корпус коллектора, 9 – приемная часть коллектора диаметром 20 мм, 10 – тонкопленочные малоиндуктивные чип-резисторы; б – конструкция выходной части генератора СЛЭП-150, газовый диод и коллектор с диаметром приемной части 3 мм: 1 – высоковольтная линия генератора, 2 – обострительный разрядник, 3 – передающая линия, 4 – емкостный делитель, 5 – газовый диод, 6 – трубчатый катод, 7 – приемная часть коллектора диаметром 3 мм, 8 – фольга, 9 – коллиматор толщиной 5 мм с диаметром отверстия 1 мм, 10 – корпус коллектора

Импульс напряжения отрицательной полярности от генератора РАДАН-220 через короткую передающую линию 1 подавался на электрод с малым радиусом кривизны 4. Напряжение измерялось с помощью емкостного делителя 2, расположенного перед разрядным промежутком. Амплитуда импульсов напряжения в режиме холостого хода составляла ≈ 250 кВ. Длительность импульса напряжения при согласованной нагрузке равнялась ≈ 2 нс на полувысоте, а длительность фронта импульса напряжения в передающей линии $\approx 0,5$ нс. Ток через промежуток измерялся с помощью токового шунта, изготовленного из тонкопленочных малоиндуктивных чип-резисторов 10. Потенциальный электрод (катод) 4 был изготовлен из нержавеющей стали в виде конуса с углом раствора 82° и диаметром основания 6 мм. Радиус кривизны вершины конуса составлял $\sim 0,1$ мм. В ряде экспериментов использовался трубчатый электрод диаметром 6 мм, изготовленный из фольги нержавеющей стали толщиной 100 мкм, а также электрод, изготовленный из швейной иглы. Заземленный плоский электрод (анод) 6 из сетки или фольги располагался на расстоянии 4–16 мм от торца потенциального электрода 4. В том случае, когда заземленный электрод был сетчатым для подавления тока смещения, перед приемной частью коллектора устанавливалась Al фольга 7 толщиной 10 или 50 мкм. На данной установке ПУЭ регистрировался с помощью коллектора 8 с диаметром приемной части 9 20 мм.

На рис. 16 показана конструкция выходной части генератора СЛЭП-150, газовый диод и коллектор с диаметром приемной части 3 мм. Одним из электродов высоковольтной линии генератора 1 являлся корпус обострительного разрядника 2. Это позволило уменьшить длину линии и формировать импульс напряжения амплитудой ~ 150 кВ и длительностью на полувысоте в случае согласованной нагрузки ≈ 1 нс. Длительность фронта импульса напряжения определялась обострительным разрядником и при его оптимальном срабатывании составляла ≈ 250 пс по уровню 0,1–0,9. Газовый диод 5 соединялся с высоковольтной линией 1 через короткую передающую линию 3 с волновым сопротивлением 100 Ом. Амплитуда волны напряжения в передающей линии зависела от пробивного напряжения обострительного разрядника 2 и с различными разрядниками могла изменяться от 120 до 200 кВ. На данной установке применялись катоды в виде трубки диаметром 6, 7 и 20 мм, изготовленные из фольги из нержавеющей стали толщиной 100 мкм; конуса с углом раствора 82° и диаметром основания 6 мм; иглы; шара диаметром

9,5 мм. Также применялся катод в виде кольца с дном диаметром 30 либо 40 мм и высотой 3 мм, на торце которого были натянуты параллельно друг другу проволоки диаметром 0,2 мм с шагом 4 мм. Анод газового диода был выполнен из алюминиевой фольги 8 толщиной 10 мкм, которая со стороны коллектора армировалась сеткой или коллиматором 9. В ряде экспериментов фольга заменялась на сетку с прозрачностью по свету 14, 18 и 64 %. Ток ПУЭ (число электронов) регистрировался с помощью коллекторов с диаметром приемной части 3 и 20 мм. Полное число электронов в пучке за фольгой измерялось коллектором с диаметром 56 мм. Временное разрешение коллектора с приемной частью 3 мм достигало 20 пс, а с приемной частью 20 мм – 80 пс.

В ряде экспериментов использовался генератор СЛЭП-150М, который имел дополнительную передающую линию со встроенными емкостными делителями напряжения, которая обеспечивала возможность регистрировать как падающую (идущую от генератора), так и отраженную от газового диода волны напряжения. Это позволяло восстанавливать напряжение на промежутке. Газовые диоды обычно заполнялись воздухом атмосферного давления.

Сигналы с емкостного делителя напряжения, токового шунта, коллектора регистрировались цифровыми осциллографами реального времени LeCroy WaveMaster 830Zi-A (полоса пропускания 30 ГГц, шаг дискретизации 12,5 пс) и Tektronix DSA72504D (полоса пропускания 30 ГГц, шаг дискретизации 10 пс). Сигналы передавались на осциллограф по высокочастотным кабелям RG58-A/U (Radiolab) длиной 1 м с коннекторами типа N (Suhner 11 N-50-3-28/133 NE) и SMA (Radiall R125.075.000). Для ослабления сигналов применялись высокочастотные аттенюаторы 142-NM фирмы Barth Electronics с полосой пропускания до 30 ГГц. В том случае, когда ПУЭ регистрировался коллектором с диаметром приемной части 3 мм, электрический сигнал с него подавался на осциллографы без ослабителей. Все три параметра (напряжение, ток через промежуток и ток пучка) регистрировались одновременно за один импульс. ПУЭ и РИ также фиксировались по почернению пленки РФ-3, которая помещалась в конверт из черной бумаги толщиной 120 мкм. Свечение плазмы разряда в промежутке фотографировалось цифровым фотоаппаратом Sony A100.

ПУЭ, регистрируемый за анодом из фольги, нами было предложено называть сверхкоротким лавинным электронным пучком (СЛЭП), далее будем использовать этот термин.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

2.1. Наблюдаемые формы разряда при атмосферном давлении воздуха и азота

При подаче наносекундных импульсов напряжения на промежуток с неоднородным распределением напряжённости электрического поля в зависимости от величины d формируется разряд различной формы, рис. 1.

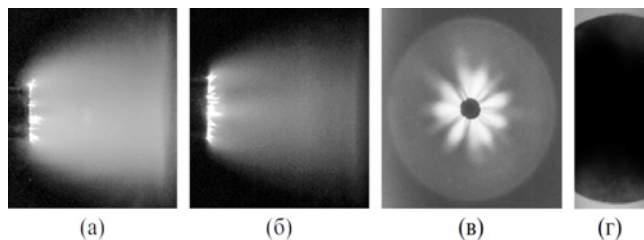


Рис. 2. Фотографии излучения плазмы разряда в азоте (а) и воздухе (б, в) и автограф СЛЭП на пленке РФ-3 (г), полученные на установках с генератором РАДАН-220 (а, б) и генератором СЛЭП-150 (в, г) за один импульс при давлении в газовом диоде 1 атмосфера. $d = 14$ (а, б) и 11 мм (в, г). Диаметр трубчатого катода рисунках (а, б) 6 мм, на рисунках (в, г) – 7 мм

При удалении анода на большие расстояния у катода формируется диффузный коронный разряд. При уменьшении d диффузный разряд заполняет промежуток, а яркость его свечения возрастает. Данный режим разряда предложено называть ОРИПЭЛ – объемный разряд, инициируемый пучком электронов лавин. Подробно ОРИПЭЛ описан в [8].

На рис. 2а и 2б показаны фотографии свечения плазмы ОРИПЭЛ в азоте и воздухе, полученные на установке с генератором РАДАН-220 (см. рис. 1а) за один импульс. И в азоте, и в воздухе атмосферного давления формируется диффузный разряд. Яркие пятна видны только на катоде с малым радиусом кривизны. При заполнении газового диода азотом диффузный разряд визуально более однороден и примыкает к боковой поверхности трубчатого катода (рис. 2а). На фотографии ОРИПЭЛ в воздухе (рис. 2б) видно, что диффузный разряд в промежутке состоит из отдельных струй.

На рис. 2 в показана фотография интегрального свечения плазмы ОРИПЭЛ со стороны анода из сетки, полученная на установке с генератором СЛЭП-150. Около трубчатого катода наблюдается яркое свечение, состоящее из диффузных струй, которые замыкаются на сетку. При наблюдении ОРИПЭЛ через боковое окно (рис. 2а и 2б) свече-

ние отдельных струй в азоте и воздухе атмосферного давления перекрывается и на интегральных фотографиях в азоте они практически не заметны. С ростом давления газа диаметр отдельных диффузных струй уменьшается, и они становятся видны при наблюдении через боковое окно. При давлении ниже атмосферного диффузные струи перекрываются и на интегральных фотографиях их обычно не видно. На кромке катода (рис. 2в), как и на рис. 2а и 2б, заметны яркие пятна, с которых берут начало диффузные струи. Из рис. 2в видно, что область промежутка близки оси газового диода, диаметр которой соответствует диаметру трубчатого катода, имеет наименьшую интенсивность свечения. Однако на автографе электронного пучка (рис. 2г) уменьшение почернения пленки РФ-3 вблизи оси газового диода с трубчатым катодом диаметром 6 мм при $d = 12$ мм не наблюдалось.

2.2. Осциллограммы импульсов напряжения на газовом диоде и тока через промежуток

При формировании ОРИПЭЛ сопротивление плазмы диффузного разряда обычно меньше, чем у генератора. В результате реализуется колебательный режим разряда. С ростом давления газа и/или величины d , а также при заполнении газового диода электроотрицательным газом SF_6 , сопротивление разрядной плазмы возрастает и реализуется аperiодический режим разряда. При малых d промежуток перекрывается искровым каналом за несколько наносекунд или менее. Это приводит к еще большему уменьшению сопротивления плазмы в разрядном промежутке и увеличению числа колебаний тока разряда через промежуток. Однако СЛЭП в данных условиях, даже при малых d , регистрируется в начале диффузной стадии разряда, до образования искрового канала. На рис. 3 показаны начальные участки осциллограмм импульсов напряжения и тока через промежуток.

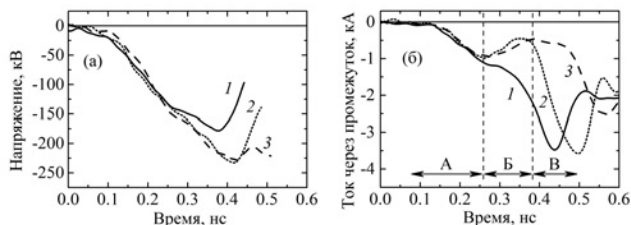


Рис. 3. Начальные участки осциллограммы импульсов напряжения (а) и тока через промежуток (б) при $d = 6$ (1), 12 (2) и 18 мм (3). Генератор СЛЭП-150. Катод – трубка диаметром 6 мм

На данных осциллограммах, полученных с высоким временным разрешением, можно выделить три характерные стадии разряда. При подаче импульса напряжения на промежуток вначале регистрируется ток смещения «холодного» диода, равный $C(dU/dt)$, где C – емкость «холодного» диода, U – напряжение на промежутке (участок А на рис. 3). Под «холодным» диодом мы понимаем диод, в котором пока еще отсутствует плотная плазма, из которой «вытесняется» электрическое поле. Отметим, что на рис. 3 приведены импульсы напряжения с емкостного делителя в генераторе СЛЭП-150, расположенного на расстоянии 22 мм от анода. Это приводит к тому, что вначале делителем регистрируется фронт падающей волны, а затем, спустя, примерно, 100 пс, на делитель приходит фронт отраженной волны и теперь уже делителем регистрируется сумма этих двух волн. Поэтому на рис. 3 осциллограмма импульса тока через промежуток сдвинута относительно начала импульса напряжения примерно на 100 пс. При $d = 6$ мм ток смещения продолжает нарастать спустя ≈ 250 пс от момента прихода импульса напряжения на емкостной делитель, в то время как dU/dt начинает спадать. На участке Б (рис. 3б) для импульса 1 ток через промежуток незначительно уменьшается, а затем увеличивается. Это обусловлено вкладом динамического емкостного тока, за счет зарядки «сжимающегося конденсатора» C^* , образованного фронтом плотной плазмы, распространяющейся от трубчатого катода, и плоским анодом $[U(dC^*/dt)]$. При достижении фронтом плотной плазмы анода, вторая волна ионизации проходит через промежуток в обратном направлении с более высокой скоростью и ток через промежуток определяется током проводимости, см. участок В на рис. 3б.

2.3. Осциллограммы импульсов тока СЛЭП и их положение относительно импульсов напряжения и тока через промежуток

Для определения момента генерации СЛЭП сигналы с коллектора при аноде из фольги и аноде из сетки записывались последовательно при одинаковых импульсах напряжения и/или тока через промежуток. Это позволило определять положение импульсов тока СЛЭП, регистрируемых коллектором, с точностью в десятки пикосекунд относительно остальных импульсов. На рис. 4 показан пример привязки осциллограмм импульсов тока СЛЭП к осциллограммам импульса напряжения при использовании анода из сетки и фольги (осциллограммы 1, 3 и 2, 4 на рис. 4, соответственно). Катод – трубка диаметром 6 мм.

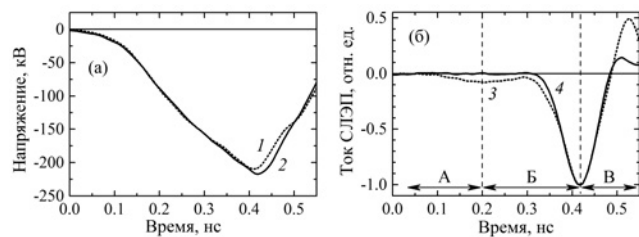


Рис. 4. Осциллограммы импульсов напряжения (а) и сигналов с коллектора с диаметром приемной части 20 мм (б), расположенного за сеткой с прозрачностью 64 % (1, 3) и алюминиевой фольгой толщиной 10 мкм (2, 4). Генератор СЛЭП-150. $d = 12$ мм

На рис. 4, также, как и на рис. 3, приведены импульсы напряжения с емкостного делителя в генераторе СЛЭП-150, расположенного на расстоянии 10 мм от торца катода. В результате фронт падающей волны напряжения регистрировался на ≈ 60 пс раньше. Спады и амплитуды импульсов с коллектора обусловлены током СЛЭП. Значительный по амплитуде положительный выброс на осциллограмме тока с коллектора (осциллограмма 3, рис. 4б) после импульса СЛЭП при аноде из сетки связан с влиянием положительного заряда ионов, которые остались у анода после ухода убегающих электронов через сетку. В случае анода из сетки, начальная часть сигнала с коллектора (участок А на рис. 4б) обусловлена протеканием тока смещения «холодного» газового диода. Затем коллектором регистрируется динамический емкостной ток и ток СЛЭП (участок Б на рис. 4б). Динамический емкостной ток, как и при регистрации тока через промежуток шунтом (рис. 3б) при межэлектродном зазоре 6 мм начинает регистрироваться через примерно 250 пс после прихода импульса напряжения на емкостной делитель. Это значит, что за это время с катода уже эмитировались первые электроны и в промежутке начала формироваться плотная плазма. Максимум тока СЛЭП при $d = 12$ мм и атмосферном давлении воздуха регистрируется вблизи максимума напряжения на промежутке (рис. 4).

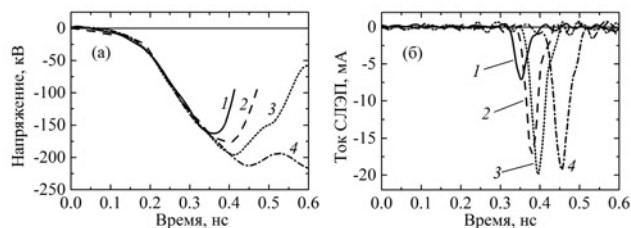


Рис. 5. Осциллограммы импульсов напряжения (а) и тока СЛЭП (б), прошедшего через 1 мм отверстие в коллиматоре толщиной 5 мм и алюминиевую фольгу толщиной 10 мкм при $d = 4$ (1), 8 (2), 12 (3) и 16 мм (4). Генератор СЛЭП-150. Катод – трубка диаметром 6 мм

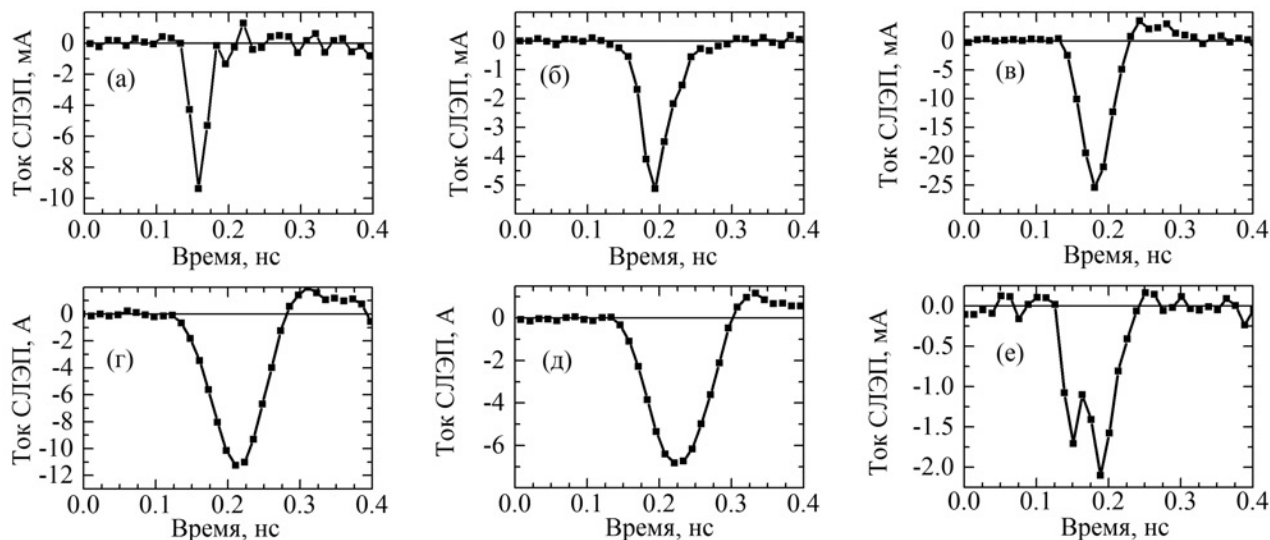


Рис. 6. Осциллограммы импульсов тока СЛЭП. Катод – шар, $d = 6$ мм (а); катод – трубка, $d = 12$ мм (б, в, г, д, е). Коллектор с диаметром приемной части 3 (а, б, в, е) и 20 мм (г, д), отверстие в коллиматоре 1 (а, б, е), 4 (в) и 18 мм (д)

На рис. 5 показаны осциллограммы импульсов напряжения и тока СЛЭП при различных d . Для регистрации СЛЭП использовался коллектор с диаметром приемной части 3 мм.

Применение коллектора с диаметром приемной части 3 мм позволяло корректно регистрировать импульсы тока пучка, длительность которых на полувысоте составляет 25 пс, а также более. При уменьшении d максимальное напряжение на промежутке уменьшалось, однако время задержки начала регистрации тока СЛЭП коллектором за анодной фольгой было минимальным относительно фронта импульса напряжения. В данных экспериментах привязка импульсов тока пучка друг к другу и импульсов напряжения друг к другу была не хуже 10 пс.

2.4. Влияние коллектора, коллиматора и катода на амплитуду и длительность тока СЛЭП

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов СЛЭП, полученные при использовании различных коллекторов и катодов, а также коллиматоров. Длительность импульса для катода в виде шара и межэлектродного промежутка 6 мм составила на полувысоте ≈ 25 пс, рис. 6а. Минимальные длительности импульсов тока пучка регистрируются при катодах в виде шара и конуса с малыми межэлектродными зазорами (2–6 мм). При переходе к катоду в виде трубки, который имел длину эмитирующей электроны кромки 19 мм, а также при увеличении межэлектродного зазора длительность импульса тока пучка увеличивается.

Импульс тока СЛЭП, показанный на рис. 6б, имеет длительность на полувысоте ≈ 40 пс. Еще больше длительность импульса тока СЛЭП была при увеличении диаметра отверстия в коллиматоре и уменьшении его толщины (рис. 6в, 6г и 6д).

Импульс тока СЛЭП, показанный на рис. 6г с длительностью на полувысоте ≈ 80 пс демонстрирует разрешающую способность коллектора с диаметром приемной части 20 мм. Типичную длительность тока СЛЭП ≈ 100 пс с значительной частью анодной фольги имеет импульс на рис. 6д. Кроме того, при пикосекундном временном разрешении были зарегистрированы импульсы СЛЭП, имеющие 2–3 пика с расстоянием между ними ≈ 30 пс. Пример импульса с двумя пиками приведен на рис. 6е.

Отметим, что наибольшие амплитуды тока СЛЭП в воздухе атмосферного давления были получены с генератором СЛЭП-150 при амплитуде падающей волны напряжения 200 кВ и катоде из параллельно натянутых проволок, которые закреплялись на кольце диаметром 40 мм [7, 8]. Число электронов в пучке достигало $\sim 6.2 \cdot 10^{10}$, что соответствует амплитуде тока СЛЭП ≈ 100 А при длительности импульса на полувысоте ≈ 100 пс.

Заключение

На основе экспериментальных исследований амплитудно-временных параметров пучков убегающих электронов, проведенных с пикосекундным временным разрешением, и характеристик разряда

можно сделать следующие выводы (см. также [10]):

Измерение тока смещения «холодного диода» при использовании сетчатого анода с подобранной прозрачностью и размером ячейки сетки, а также динамического тока смещения вместе с током СЛЭП с помощью коллектора позволяет осуществлять привязку импульсов тока СЛЭП к импульсам напряжения и импульсам тока через промежутки с точностью в несколько десятков пс.

При атмосферном давлении воздуха, азота и амплитудах импульса напряжения в сотни кВ длительность импульса тока СЛЭП за всей поверхностью анодной фольги составляет ≈ 100 пс на полувысоте. При регистрации части убегающих электронов за счет применения коллиматоров с малым диаметром отверстия можно сократить длительность импульса до ≈ 20 пс и использовать данный импульс для тестирования коллекторов и систем регистрации.

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

Список литературы

1. Frankel S., Highland V., Sloan T. et al. Observation of X-rays from spark discharges in spark chamber // *Nuclear Instruments and Methods*. 1966. V. 44. P. 345–348.
2. Wilson C. T. R. The acceleration of β -particles in strong electric fields such as those of thunderclouds // *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1924. V. 22. P. 534–538.

3. Станкевич Ю. Л., Калинин В. Г. Быстрые электроны и рентгеновское излучение в начальной стадии развития разряда // *ДАН СССР*. 1967. Т. 177, № 1. С. 72–73.

4. Тарасова Л. В., Худякова Л. Н. Рентгеновское излучение при импульсных разрядах в воздухе // *ЖТФ*. 1969. Т. 39, № 8. С. 1530–1533.

5. Тарасова Л. В., Худякова Л. Н., Лойко Т. В., Цукерман В. А. Быстрые электроны и рентгеновское излучение наносекундных импульсных разрядов в газах при давлениях 0.1–760 Тор // *ЖТФ*. 1974. Т. 44, № 3. С. 564–568.

6. Babich L. P. High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment, and Natural Phenomena. (ISTC Science and Technology Series, V. 2) Arlington, VA: Futurepast, 2003.

7. Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления / Под ред. В. Ф. Тарасенко. Томск: STT, 2015.

8. Runaway Electrons Preionized Diffuse Discharges / Ed. by V. F. Tarasenko. New York: Nova Science Publishers, Inc. 2014.

9. Levko D., Krasik Ya. E., Tarasenko V. F. Present status of runaway electron generation in pressurized gases during nanosecond discharges // *Int. Rev. Phys.* 2012. V. 6, N 2. P. 165–195.

10. Тарасенко В. Ф., Бакшт Е. Х., Белоплов Д. В. и др. Амплитудно-временные характеристики сверхкороткого лавинного электронного пучка при субнаносекундном пробое в воздухе и азоте // *Физика плазмы*. 2016. Т. 42, № 4. С. 376–390.