

ГЕНЕРАЦИЯ СВЕРХКОРОТКОГО ЛАВИННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

© 2014 г. Е. Х. Бакшт*, А. Г. Бураченко*, М. В. Ерофеев*., В. Ф. Тарасенко*.,**

* Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

** Томский политехнический университет, Томск, Россия

e-mail: bag@loi.hcei.tsc.ru, vfi@loi.hcei.tsc.ru, beh@loi.hcei.tsc.ru, mve@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 26.09.2013 г.

Окончательный вариант получен 21.11.2013 г.

В импульсно-периодическом режиме исследованы генерация сверхкороткого лавинного электронного пучка (с.л.э.п.) и рентгеновского излучения в азоте, а также переход от режима однократных импульсов к режиму с высокой частотой следования импульсов. Показано, что в импульсно-периодическом режиме длительность с.л.э.п. на полувысоте больше, а скорость спада напряжения на промежутке меньше, чем в режиме однократных импульсов. Установлено, что экспозиционная доза рентгеновского излучения в импульсно-периодическом режиме увеличивается при давлении азота 90 Торр более чем на порядок, если фронт импульса напряжения уменьшается с 2.5 до 0.3 нс. Число электронов в с.л.э.п. при этом также возрастает. Показано, что при импульсно-периодическом режиме и формировании диффузного разряда нагрев газа в разрядном промежутке приводит к увеличению амплитуды с.л.э.п. (числа электронов в пучке) в несколько раз. При напряжении генератора 25 кВ и давлении азота 90 Торр пучок убегающих электронов зарегистрирован за анодной фольгой при частоте следования импульсов 3.5 кГц.

DOI: 10.7868/S0367292114050023

1. ВВЕДЕНИЕ

Убегающие электроны (УЭ) при повышенных давлениях различных газов оказывают существенное влияние на процессы, происходящие при наносекундных разрядах в неоднородном электрическом поле и генерацию рентгеновского излучения [1–6]. Благодаря генерации УЭ и рентгеновского излучения при давлении одна атмосфера и более в воздухе и других газах формируются диффузные разряды [2–9]. В ряде работ сообщалось о прямой регистрации посредством коллектора или шунта за анодом из фольги или сетки пучков УЭ, генерируемых в воздухе атмосферного давления (см. [2–6, 8–17] и ссылки в этих работах). В работе [15] пучок УЭ, регистрируемый за анодом газового диода, было предложено называть сверхкороткий лавинный электронный пучок (с.л.э.п.).

Обоснуем такое название. В режиме однократных импульсов длительность с.л.э.п. на полувысоте в воздухе атмосферного давления со всей поверхности анодной фольги составляет ~0.1 нс [3–6, 8, 11, 16]. Поэтому с.л.э.п. является “сверхкоротким”. Измерения длительности и амплитуды с.л.э.п. с временным разрешением до 20 пс [13, 14], проведенные в последние годы, подтвердили этот результат и позволили уточнить длительность и амплитуду с.л.э.п. в различных условиях

вывода пучка через анод. Мы считаем, что основное число убегающих электронов при пробое в неоднородном электрическом поле генерируется между поляризованным фронтом волны ионизации и анодом [4, 11, 15, 17]. При этом концентрация плазмы за фронтом волны ионизации весьма высокая. Это приводит к вытеснению электрического поля из области волны ионизации и ее фронта. Для формирования плотной плазмы необходимо развитие значительного числа электронных лавин в промежутке, которые перекрываются и с большой скоростью заполняют промежутки от катода к аноду. Поэтому в термине с.л.э.п. используется слово “лавинный”. В данном режиме разряда нет генерации лавин убегающих электронов, предложенных в [18]. К эффективной генерации с.л.э.п. приводит образование обычных электронных лавин, перекрытие их головок во фронте волны ионизации и вытеснение электрического поля из плотной плазмы [6, 11, 13].

К настоящему времени большинство прямых измерений с.л.э.п. с помощью коллектора или шунта были выполнены в режиме однократных импульсов или при малых частотах. При работе газового диода в импульсно-периодическом режиме в результате последовательности импульсов газ в разрядном промежутке нагревается. Наи-

большие температуры газа достигаются в области разрядной плазмы, а охлаждение газа в отсутствие прокачки происходит за счет контакта нагретого газа со стенками разрядной камеры. При этом давление газа в разрядной камере может существенно не изменяться. Однако нагрев газа приводит к уменьшению концентрации частиц N в промежутке и увеличению параметра E/N , где E – напряженность электрического поля. Как известно [2–5] уменьшение давления газа в нормальных условиях, что равносильно уменьшению концентрации частиц газа, обычно приводит к увеличению амплитуды с.л.э.п. Однако при использовании генераторов с амплитудой импульсов напряжения >100 кВ и токах разряда через промежутки в единицы килоампер в воздухе атмосферного давления наблюдается значительное уменьшение амплитуды с.л.э.п. при частотах >10 Гц [19]. С другой стороны, при работе в режиме пачек импульсов и использовании сферического катода с тем же генератором было зарегистрировано при повышенных частотах увеличение экспозиционной дозы рентгеновского излучения с ростом частоты [20].

Увеличение длины разрядного промежутка и длительности (~ 30 нс) импульса напряжения с амплитудой ≥ 100 кВ в стационарном импульсно-периодическом режиме позволило получать диффузный разряд с малыми удельными энергетическими кладами за импульс при частоте следования импульсов до 1 кГц [9, 21]. В этих условиях также было зарегистрировано увеличение импульсной интенсивности рентгеновского излучения с ростом частоты повторения импульсов. Таким образом, в ряде работ [9, 20, 21] наблюдалось увеличение экспозиционной дозы рентгеновского излучения при увеличении частоты, что можно было объяснить нагревом газа в промежутке и увеличением параметра E/N . Однако с.л.э.п. за анодом из фольги или сетки в этих условиях зарегистрированы не были.

Цель данной работы – исследовать параметры с.л.э.п. и экспозиционные дозы рентгеновского излучения в импульсно-периодическом режиме при разных длительностях фронта импульса напряжения. Реализация данной цели позволит создавать импульсно-периодические ускорители электронов и источники рентгеновского излучения с субнаносекундной длительностью импульса, а также получить новые данные о причинах формирования диффузных разрядов при повышенных давлениях. Вторая задача, которая ставилась в данной работе, зарегистрировать с.л.э.п. при частотах следования импульсов более 1 кГц. Данная работа продолжает исследования, начатые в [21, 22], где с.л.э.п. при напряжении в десятки киловольт и давлении гелия ~ 100 Торр был получен при частоте следования импульсов 1 кГц.

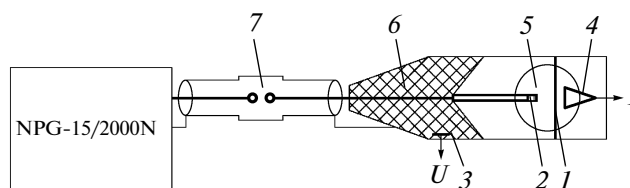


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – анод, 2 – катод, 3 – емкостной делитель напряжения фольги, 4 – приемная часть коллектора, 5 – газовый диод, 6 – изолятор газового диода, 7 – обострительный разрядник.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКИ

В экспериментах использовалась разрядная камера, показанная на рис. 1, на которую подавались импульсы напряжения от генератора NPG-15/2000N [23]. Генератор формировал импульсы напряжения с амплитудой до 35 кВ и частотой до 3.5 кГц, которые по кабелю длиной 3 м с волновым сопротивлением 75 Ом подавались на разрядный промежуток. Длительность импульса напряжения на полувысоте составляла ~ 6 нс при фронте ~ 2.5 нс на уровне 0.3–0.9 и работе на согласованную нагрузку (75 Ом). В ряде экспериментов между генератором и разрядной камерой устанавливался обострительный разрядник 7, благодаря которому длительность фронта импульса напряжения сокращалась до ~ 0.3 нс. Межэлектродный промежуток в большинстве экспериментов равнялся 12 мм. Разрядная камера 5 была подключена к газовому пульту с вакуумметром, с помощью которого в процессе работы контролировалось давление в разрядной камере. Объем разрядной камеры равнялся 200 см^3 , а газовой системы $\sim 1000 \text{ см}^3$.

В работе использовался трубчатый катод из нержавеющей стали диаметром 6 мм. Отметим, что промежуток с зазором 12 мм является оптимальным для трубчатого катода диаметром 6 мм [4, 14]. Толщина кромки катода равнялась 200 мкм, а кромка была округлена. Анодом служила сетка с прозрачностью 64% и размером отдельной ячейки 1×1 мм. За основной сеткой на расстоянии 2 мм устанавливалась дополнительная сетка, которая экранировала коллектор от динамического емкостного тока [17] и защищала коллектор от попадания на него разрядной плазмы. Вторая сетка имела прозрачность 30%. Динамический емкостной ток возникает за счет зарядки емкости “сжимающегося” конденсатора, который возникает между фронтом плотной плазмы, распространяющейся во время пробоя промежутка от катода к аноду, и анодом [17]. Для появления динамического емкостного тока необходимо, чтобы концентрация плазмы в части промежутка дости-

гала $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, а электрическое поле вытеснялось из этой плазмы. Величина динамического емкостного тока зависит от фронта импульса напряжения и конструкции электрода, с малым радиусом кривизны. В работе [17] при длительности фронта импульса напряжения 0.3 нс и его амплитуде 250 кВ величина емкостного динамического тока достигала 4 кА.

В ряде экспериментов вторая сетка заменялась фольгой из алюминия толщиной 3 мкм или металлизированной (слой алюминия толщиной 0.2 мкм) пленкой из кимфоли ($\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_3$) толщиной 2 мкм. При использовании в качестве анода Al фольги или пленки из кимфоли, динамический емкостной ток коллектором не регистрировался. Для регистрации тока пучка применялся конический коллектор с диаметром приемной части 20 мм, который описан в работах [4, 11]. Амплитуды тока или число электронов в пучке, приводимые в статье, соответствуют амплитудам с.л.э.п., регистрируемым в данной работе с площади анодной фольги диаметром 20 мм. Центр этой площадки находился на оси газового диода. Коллектор устанавливался за двумя сетками или за сеткой и фольгой. Потери тока пучка в сетках и фольге при измерениях не учитывались. Временное разрешение коллектора и всей системы регистрации было не хуже 0.1 нс. Для определения временного разрешения системы регистрации на коллектор, используемый в работе, подавались импульсы тока пучка длительностью 25–50 пс от генератора СЛЭП-150 [8]. При этом длительность импульса тока пучка возрастала до 90 пс, а произведение амплитуда импульса на длительность импульса на полувысоте оставалось без изменения. Ток разряда измерялся с помощью шунта, изготовленного из чип-резисторов [11], который устанавливался вместо коллектора. Временное разрешение шунта также проверялось при регистрации им коротких импульсов (~ 100 пс). Сигналы с емкостного делителя, установленного в разрядной камере, шунта и коллектора подавались на осциллограф DPO70604 (6 ГГц, 25 выборок за наносекунду), либо на осциллограф TDS3034 (300 МГц, 2.5 выборки за наносекунду).

Рентгеновское излучение регистрировалось дозиметром Arrow-Tech, Inc (Model 138). Порог чувствительности дозиметра по оценкам соответствовал энергии квантов ~ 5 кэВ. При энергии квантов 16 кэВ чувствительность дозиметра была на 20% меньше максимальной чувствительности, которая достигалась при энергиях 30–1000 кэВ. Дозиметр помещался вместо коллектора на задней стенке разрядной камеры. Анодом вместо сетки в этом случае служила медная фольга толщиной 20 мкм, а вторая сетка убиралась. Свечение разряда фотографировалось через боковое окно фотоаппаратом Sony A100.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1. Формирование диффузного разряда

Проведенные исследования показали, что для формирования диффузного разряда при повышенных частотах необходимо использовать наносекундные генераторы со сравнительно малыми энергиями в импульсе. Поэтому эксперименты были выполнены при наносекундной длительности импульса напряжения с амплитудой до 35 кВ. Однако при таких напряжениях с.л.э.п. при атмосферном давлении азота и воздуха коллектором пока зарегистрировать не удастся, в том числе в режиме однократных импульсов [24]. Поэтому рабочее давление азота было уменьшено. Благодаря малым напряжениям диффузный разряд был получен при высоких частотах в широком диапазоне давлений. При этом с.л.э.п. был впервые зарегистрирован коллектором при частоте следования импульсов более 1 кГц.

Интегральная форма диффузного разряда в промежутке зависела от частоты следования импульсов, амплитуды импульса напряжения и времени работы генератора. При малых частотах следования импульсов (~ 100 Гц) разряд стабильно формировался симметрично относительно центральной оси разрядной камеры, рис. 2а. Все фотографии сделаны через боковое окно при одном положении фотоаппарата. В режимах с малыми и средними частотами (рис. 2а и на рис. 2б) яркие пятна отсутствовали как на трубчатом катоде *K*, так и на сетчатом плоском аноде *A*. С увеличением частоты, разряд охватывал часть области над центральной частью разрядного промежутка, рис. 2б. При дальнейшем увеличении частоты положение разряда в камере становилось нестабильным. На интегральных фотографиях свечения промежутка видно, что разряд оставался диффузным, однако замыкался на различные участки анода. При этом, основное свечение из разрядной области могло быть как выше, так и ниже центральной оси промежутка. Увеличение частоты следования импульсов более 1 кГц могло снова стабилизировать положение разрядной области. Однако интегральное свечение диффузного разряда концентрировалось ниже центральной оси промежутка, а на катоде появлялись яркие пятна (рис. 2в).

На рис. 3а показаны осциллограммы импульса напряжения на промежутке и тока разряда. Видно, что при амплитуде импульса напряжения генератора 25 кВ пробой наступает при напряжении близком к напряжению генератора при холостом ходе, и что ток разряда и напряжение не имеют осцилляций. Следовательно, сопротивление разрядной плазмы достаточно высоко. Емкостная составляющая на осциллограмме тока разряда при данной форме импульса напряжения сравнительно мала. Осциллограммы импульса

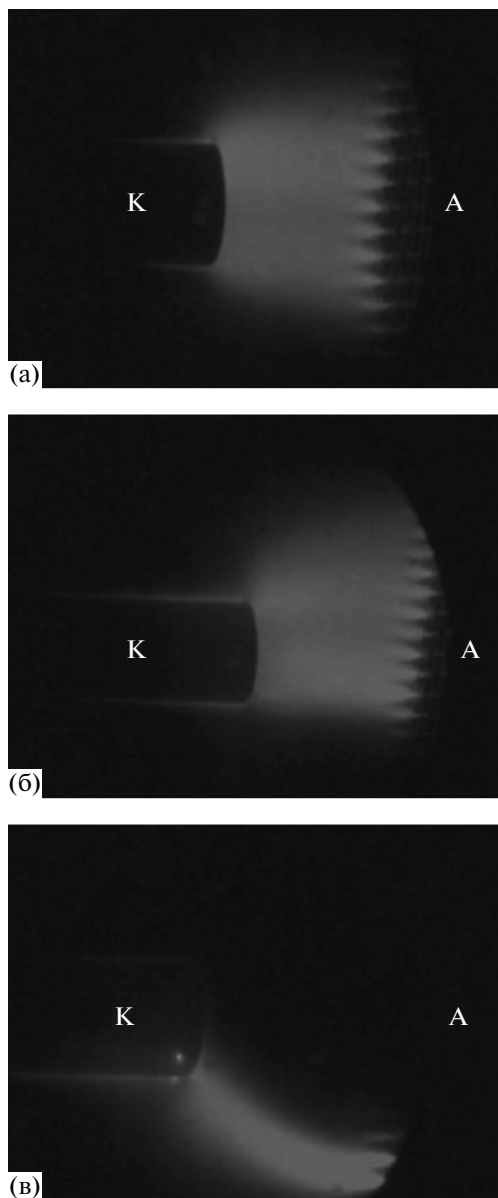


Рис. 2. Фотографии разряда в N_2 при давлении 90 Торр и частотах следования импульсов 100 Гц (а), 500 Гц (б), 2500 Гц (в). Напряжение генератора 35 кВ. На свечении разряда у анода *A* видна структура сетки.

напряжения на промежутке и с.л.э.п. при амплитуде импульса напряжения генератора 25 и 35 кВ приведены на рис. 3б и в, соответственно. Фотография на рис. 2а и осциллограммы на рис. 3в сняты в одинаковых условиях. Генерация основного импульса с.л.э.п. (момент времени, при котором импульс тока пучка регистрируется коллектором) совпадает с быстрым спадом напряжения на промежутке и ростом тока разряда. Кроме того, на фронте импульса напряжения при напряжении генератора 35 кВ появлялся второй импульс тока пучка малой амплитуды. Подобные импульсы с.л.э.п. на фронте импульса напряжения и фронте импульса тока разряда регистриро-

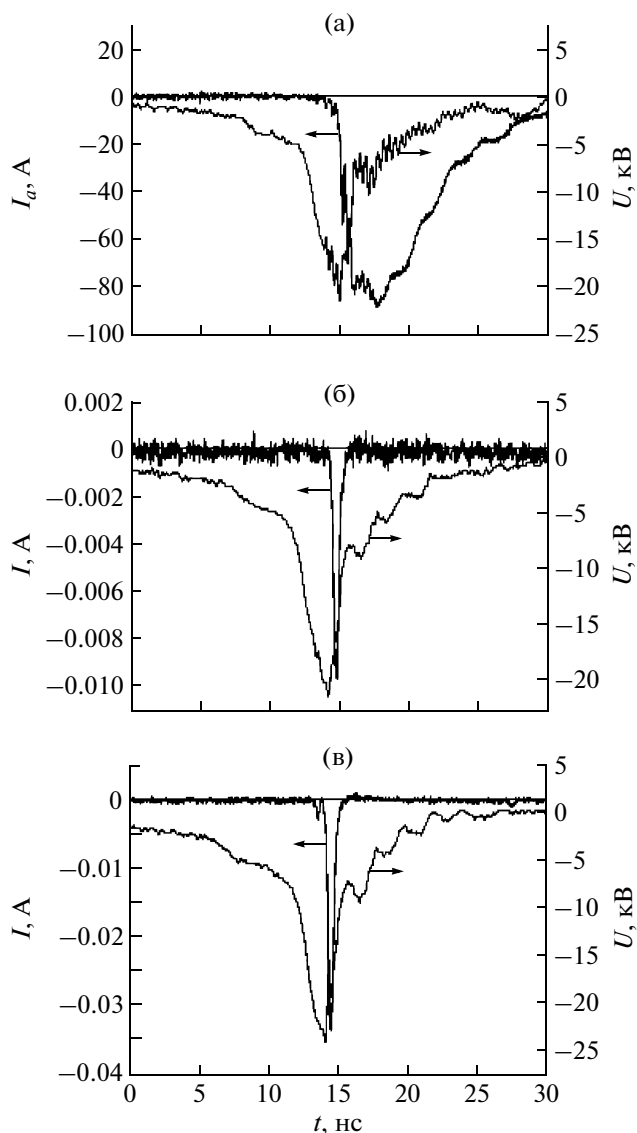


Рис. 3. Осциллограммы импульсов напряжения и тока разряда (а), импульсов напряжения и тока пучка (б), (в). Напряжение генератора 25 (а), (б) и 35 кВ (в), давление азота 90 Торр, частота следования импульсов 60 Гц.

вались нами ранее в режиме однократных импульсов при давлении азота одна атмосфера [25, 26]. Следует отметить, что при увеличении амплитуды импульса напряжения до 35 кВ, максимальное напряжение на промежутке увеличилось незначительно, см. рис. 3б и в.

3.2. Влияние нагрева азота при импульсно-периодическом режиме на характеристики с.л.э.п.

На рис. 4 приведены зависимости числа электронов в с.л.э.п. при различных частотах следования импульсов и двух напряжениях генератора от

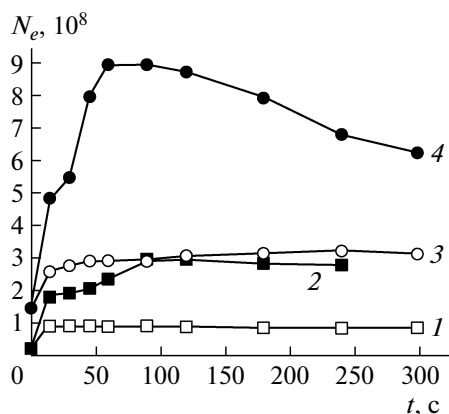


Рис. 4. Зависимость числа электронов в с.л.э.п. от времени для напряжения генератора 25 кВ при частотах 60 Гц (1) и 2000 Гц (2) и для напряжения 35 кВ при частотах 60 Гц (3) и 500 Гц (4).

времени работы генератора. Как отмечено выше, разрядная камера 5 была подключена к газовому пульту с вакуумметром, с помощью которого в процессе работы контролировалось давление. Изменение давления в газовой системе при работе генератора с максимальными параметрами составляло за 5 минут работы менее 10%.

Измерения пирометром FLUKE576 температуры бокового окна из кварца показали увеличение температуры окна при увеличении частоты следования импульсов и напряжения генератора. При частоте 60 Гц и напряжении генератора 25 кВ за 5 минут температура кварцевого окна увеличилась всего на 0.2°C . Однако при частоте следования импульсов 2 кГц и напряжении генератора 35 кВ температура кварцевого окна увеличилась на 10°C . На частоте 2.5 кГц и напряжении генератора 35 кВ через 1 минуту после его включения трубчатый катод из нержавеющей стали раскалялся докрасна и число электронов в пучке уменьшалось. Температура газа в промежутке и температура массивной камеры из нержавеющей стали не измерялась.

Каждая точка на рис. 4, кроме первой (которая соответствует первым импульсам с.л.э.п. после включения генератора), на данных зависимостях показывает усреднение по 128 импульсам. Видно, что при малой частоте (60 Гц) число электронов в с.л.э.п. возрастает, а затем за время ~ 60 с стабилизируется. Увеличение напряжения генератора до 35 кВ и энергии в отдельном импульсе в два раза при частоте следования импульсов 60 Гц дало трехкратное увеличение числа электронов в с.л.э.п. Это связано с увеличением температуры азота в промежутке и увеличением параметра E/N . Форма разряда в промежутке при малых частотах следования импульсов (~ 100 Гц) существенно не меняется. При больших частотах и амплитудах импульса напряжения может наблю-

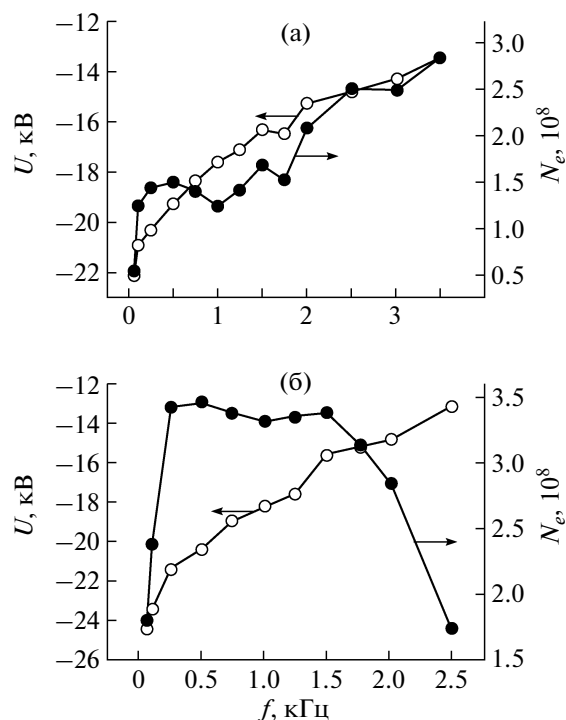


Рис. 5. Зависимость числа электронов в с.л.э.п. и напряжения от частоты следования импульсов при напряжении на генераторе 25 кВ (а) и 35 кВ (б). Давление азота 90 Торр.

даться как рост амплитуды с.л.э.п., так и ее уменьшение. При увеличении частоты диффузный характер разряда сохраняется, но форма разрядной области, как было показано выше, изменяется. Разряд начинает замыкаться на различные части анода. При амплитуде импульса напряжения 35 кВ уменьшение числа электронов с.л.э.п. начинается через более короткий промежуток времени и при меньших частотах следования импульсов, см. кривые 2 и 4 на рис. 3.

Измерения показали (рис. 5) что увеличение частоты следования импульсов приводит к уменьшению напряжения в промежутке. В то же время количество электронов в пучке и амплитуда с.л.э.п. могут увеличиваться. При амплитуде импульса напряжения 25 кВ число электронов в с.л.э.п. увеличивалось с ростом частоты вплоть до 3.5 кГц, рис. 5а. При амплитуде импульса напряжения генератора 35 кВ число электронов в с.л.э.п. увеличивалась только до частоты ~ 250 Гц. При частотах 0.25–1.5 кГц число электронов в одном импульсе существенно не изменялось, а при больших частотах начинало уменьшаться, рис. 5б. Это уменьшение можно связать с перегревом катода и газа в промежутке, что приводит к замыканию части разряда на периферийную часть анода и стенки разрядной камеры. Как отмечено выше, коллектор при этом располагался на центральной оси разрядной камеры. Кроме того, при увеличе-

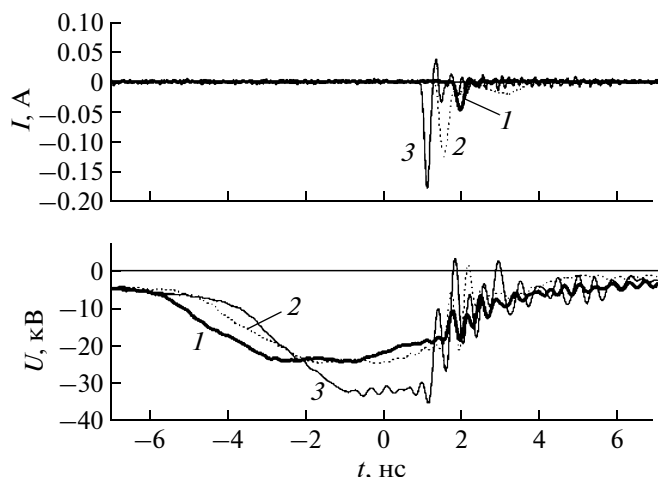


Рис. 6. Осциллограммы импульсов напряжения и тока пучка, полученные в режиме первого импульса после включения генератора при напряжении генератора 25 (1, 2) и 35 кВ (3). Давление азота 90 (1, 3) и 30 Торр (2).

нии частоты следования импульсов напряжение на промежутке уменьшалось. Как известно, уменьшение параметра E/N приводит к уменьшению амплитуды с.л.э.п. [27].

В импульсно-периодическом режиме было зарегистрировано изменение формы импульса напряжения и формы импульса с.л.э.п. На рис. 6 приведены импульсы напряжения и тока пучка, полученные в режиме однократных импульсов. Каждая пара осциллограмм тока и напряжения на рис. 3 и рис. 6 синхронизирована с точностью не хуже ~ 0.2 нс. Синхронизация импульсов с.л.э.п. и импульсов напряжения на промежутке осуществлялась по емкостному току с коллектора. Для этого за одной анодной сеткой с большой прозрачностью одновременно с током пучка регистрировался емкостной ток. Это позволяло определить положение с.л.э.п. относительно емкостного тока. Положение емкостного тока относительно импульса напряжения определялось по соотношению между величиной емкостного тока и скоростью нарастания напряжения на промежутке. Данная методика описана в работе [11] и там же приведен пример использования данной методики. Длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте в режиме однократных импульсов составила ~ 0.2 нс, а пробой промежутка при напряжении генератора 35 кВ наступал на плоской части импульса напряжения. Причем момент пробоя менялся от импульса к импульсу. Генерация с.л.э.п. в этих условиях могла наблюдаться и на спаде импульса напряжения (осциллограммы 2 и 3). Положительные выбросы на осциллограмме тока пучка (рис. 6) обусловлены влиянием положительного заряда ионов, которые остались у анода после ухода быстрых электронов, а также уменьшением

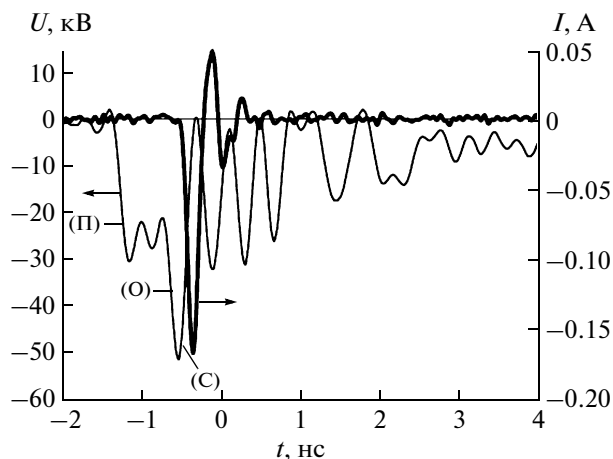


Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжения и тока пучка при частоте следования импульсов 60 Гц и установке обострительного разрядника. Давление азота 90 Торр.

длительности импульса тока пучка. При работе в импульсно-периодическом режиме, как показано выше, момент пробоя промежутка стабилизировался, длительность импульса с.л.э.п. увеличивалась до 0.45–0.6 нс, а напряжение на промежутке уменьшалось (рис. 3). При этом из-за увеличения длительности спада импульса напряжения и с.л.э.п., а также уменьшения числа электронов в с.л.э.п., влияние положительного заряда ионов на форму импульса тока пучка уменьшалось, и положительный выброс не регистрировался. При регистрации с.л.э.п. в первых импульсах после включения генератора были получены данные, совпадающие с данными, которые были получены нами ранее в режиме однократных импульсов и амплитуде импульса напряжения 25 кВ [28, 29].

3.2. Влияние фронта импульса напряжения в импульсно-периодическом режиме на характеристики с.л.э.п. и рентгеновского излучения

Все приведенные выше данные были получены при фронте импульса напряжения ~ 2.5 нс на уровне 0.3–0.9. За счет установки обострительного разрядника фронт импульса напряжения на уровне 0.1–0.9 был уменьшен до ~ 0.3 нс. На рис. 7 приведены осциллограммы импульсов напряжения и с.л.э.п. при частоте 500 Гц. Сокращение фронта импульса напряжения позволило увидеть на осциллограмме отдельно фронт падающей (П) и фронт отраженной (О) волны напряжения. Спад импульса напряжения (С) при пробое промежутка стал более коротким, чем при работе без обострителя. Амплитуда с.л.э.п. увеличилась, а длительность импульса с.л.э.п. на полувысоте в

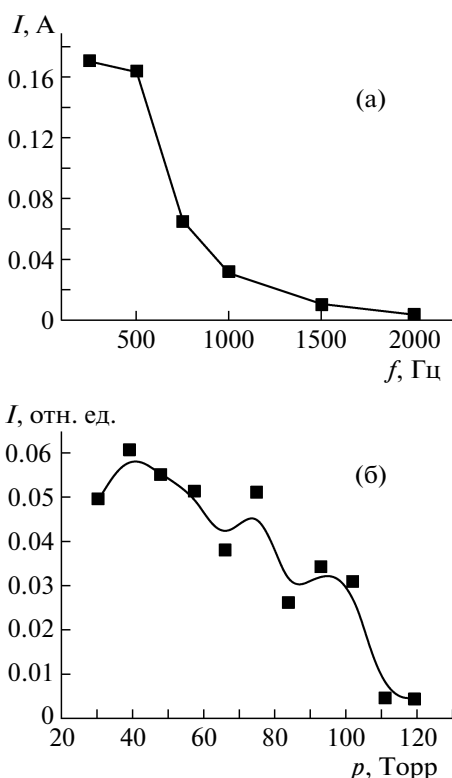


Рис. 8. Зависимость амплитуды с.л.э.п. от частоты (а) при давлении 75 Торр азота и от давления азота при частоте следования импульсов 60 Гц (б). Измерения с обострительным разрядником.

импульсно периодическом режиме уменьшилась до ~ 0.15 нс. На рис. 8 приведена зависимость амплитуды с.л.э.п. от частоты и от давления азота при использовании обострительного разрядника. Более быстрый спад амплитуды с.л.э.п. с ростом частоты при использовании обострителя (см. рис. 5б и рис. 8а) обусловлены нагревом газа не только в разрядной камере, но и в обострителе. С другой стороны, применение обострителя позволило увеличить давление азота, при котором регистрировался с.л.э.п. (рис. 8б). Однако при давлении азота одна атмосфера и использование обострителя, зарегистрировать с.л.э.п. коллектором также не удалось.

На рис. 9 приведена зависимость экспозиционной дозы рентгеновского излучения от давления азота в экспериментах с обострительным разрядником. Длительность регистрации экспозиции для каждой точки составляла 2 минуты при частоте 500 Гц (60 тыс. импульсов на одну точку). При увеличении частоты следования импульсов от 150 до 500 Гц экспозиционная доза за импульс практически не изменялась, что согласуется с зависимостью на рис. 8а. Максимальная доза рентгеновского излучения была зарегистрирована при давлении азота около 100 Торр. Амплитуда с.л.э.п. при этом давлении была в два раза меньше, чем

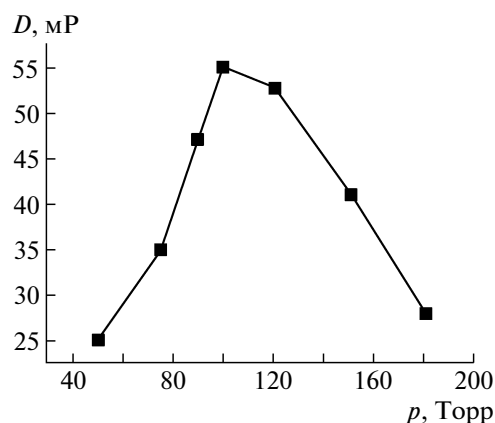


Рис. 9. Зависимость экспозиционной дозы рентгеновского излучения от давления азота в экспериментах с обострительным разрядником.

при давлении 40 Торр, рис. 8б. Таким образом, наибольшие амплитуды с.л.э.п. и экспозиционные дозы регистрировались при различных давлениях. Это связано с увеличением пробойного напряжения при увеличении давления от 40 до 100 Торр. Как известно, интенсивность рентгеновского излучения пропорциональна квадрату энергии электронов, которая пропорциональна амплитуде напряжения на промежутке. Отметим, что без обострительного разрядника при давлении азота 90 Торр экспозиционная доза рентгеновского излучения уменьшалась более чем на порядок. Измерения экспозиционных доз рентгеновского излучения с помощью дозиметра Argow-Tech, Inc (Model 138) позволили получить информацию об условиях, в которых регистрируются максимальные дозы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования показывают, что генерация с.л.э.п. является ординарным явлением и при высоких частотах следования импульсов. Однако параметры с.л.э.п. существенно изменяются при переходе от режима однократных импульсов и малых частот следования импульсов (единицы герц) к частотам в сотни—тысячи герц. В импульсно-периодическом режиме предыдущие импульсы за счет остаточной концентрации электронов и ионов в промежутке влияют на его последующий пробой. Это приводит к уменьшению пробойного напряжения и его стабилизации, а также к замедлению спада напряжения на промежутке. В условиях данного эксперимента при давлениях азота в десятки—сотни Торр стабильный пробой промежутка начинался спустя десятки—сотни импульсов.

В первых импульсах после включения генератора пробоя промежутка, как правило, не бывает, а амплитуда импульса напряжения соответствует холостому ходу. При возникновении первых пробоев задержка до начала спада напряжения на промежутке изменяется от импульса к импульсу, однако форма импульса напряжения до пробоя не изменяется. При этом длительность спада напряжения на промежутке и импульса с.л.э.п. всегда существенно короче, чем в импульсно-периодическом режиме. Это объясняется формированием с.л.э.п. в стадии пробоя промежутка за счет ускорения части электронов на фронте волны ионизации. Замедление спада импульса напряжения в импульсно-периодическом режиме приводит к уменьшению скорости фронта волны ионизации и с.л.э.п. генерируется в течение более длительного времени. Эксперимент с обострителем подтверждает это утверждение. При использовании обострителя скорость спада напряжения увеличивается и в импульсно-периодическом режиме, соответственно, сокращается длительность импульса с.л.э.п., рис. 7.

Как известно, для идеального газа уравнение состояния можно записать в виде [30]

$$p = NkT,$$

где p – давление, T – температура, N – концентрация частиц газа, k – постоянная Больцмана. Поэтому при постоянном давлении с увеличением температуры газа уменьшается его концентрация. Увеличение амплитуды с.л.э.п. в импульсно-периодическом режиме мы объясняем нагревом газа и увеличением отношения E/N , где E – напряженность электрического поля.

В условиях данного эксперимента последовательность импульсов тока приводила как к нагреву газа в промежутке, так и к уменьшению напряжения пробоя промежутка. Однако напряжение на промежутке с ростом частоты следования импульсов уменьшалось не более, чем в два раза, тогда как температура газа в промежутке увеличивается существенно больше, чем в два раза. Значительно увеличение температуры газа в промежутке подтверждает разогрев катода, который начинает светиться при повышенных частотах следования импульсов. Также увеличение температуры газа в промежутке подтверждают измерения с помощью пирометра. В теоретических работах [2, 3] показано, что число УЭ увеличивается при увеличении параметра E/N . Экспериментально это подтверждается при изменении E/N за счет вариации напряжения генератора или давления газа в промежутке. В импульсно-периодическом режиме увеличение параметра E/N и числа электронов в с.л.э.п. было достигнуто за счет нагрева азота в промежутке.

Проведенные исследования показали, что в импульсно-периодическом режиме, за счет

уменьшения удельного энерговыклада, объемный (диффузный) разряд стабильно формируется в широком диапазоне давлений. Этот режим разряда в неоднородном электрическом поле, реализованный при однократных импульсах, в [15] было предложено называть объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин (ОРИП-ЭЛ). Зарегистрировать с.л.э.п., генерация которого приводит к формированию ОРИПЭЛ в импульсно-периодическом режиме, как и в режиме однократных импульсов и малых частот, с помощью коллектора удается в существенно более узком диапазоне давлений азота, чем его сформировать. Однако рентгеновское излучение с помощью ФЭУ и сцинтиллятора, а также засветки рентгеновской пленки надежно регистрируется в широком диапазоне экспериментальных условий (см. также работу [22]). Отметим, что пучок убегающих электронов и(или) рентгеновское излучение наносекундного разряда с помощью ФЭУ и сцинтиллятора было зарегистрировано при давлении азота 40 атм. [31]. Мы считаем, что формирование ОРИПЭЛ в широком диапазоне частот и давлений, при использовании катода с малым радиусом кривизны, доказывает участие УЭ в его формировании.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования амплитуды и длительности с.л.э.п. в азоте в импульсно-периодическом режиме. Показано, что параметры с.л.э.п. сложным образом зависят от частоты следования импульсов, номера импульса, времени работы, амплитуды и фронта импульса напряжения. Установлено, что нагрев газа в импульсно-периодическом режиме может приводить к увеличению амплитуды с.л.э.п. (числа убегающих электронов в пучке) в несколько раз. При малых энерговыкладах в газ с.л.э.п. получен при частоте следования импульсов 3.5 кГц. Причем число электронов в с.л.э.п. при частоте 3.5 кГц и напряжении генератора 25 кВ было наибольшим за один импульс. Показано, что длительность импульсов с.л.э.п. зависит от скорости спада напряжения на промежутке и в импульсно-периодическом режиме увеличивается по сравнению с режимом однократных импульсов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 12-08-91150-ГФЕН_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Поляков Д.Н.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. С. 74.
2. *Babich L.P.* High-Energy Phenomena in Electric Discharges in Dense Gases: Theory, Experiment, and Natural Phenomena // ISTC Sci. and Techn. Ser. V. 2. Arlington, VA: Futurepast, 2003. 358 с.

3. Пучки убегающих электронов и разряды на основе волны размножения электронов фона в плотном газе // Тр. ИОФАН. Т. 63 / Отв. редактор С.И. Яковленко. М.: Наука, 2007. 186 с.
4. *Tarasenko V.F., Baksht E.Kh., Burachenko A.G., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Rybka D.V.* // Plasma Devices and Operation. 2008. V. 16. P. 267.
5. *Levko D., Krasik Ya.E., Tarasenko V.F.* // Internat. Rev. Phys. 2012. V. 6. P. 165.
6. *Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Ломаев М.И., Рыбка Д.В.* // ЖТФ. 2010. Т. 80. С. 51.
7. *Yatom S., Levko D., Gleizer J.Z., Vekselman V., Krasik Ya.E.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 024101.
8. *Тарасенко В.Ф., Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Костыря И.Д., Рыбка Д.В.* // Физика плазмы. 2013. Т. 39. С. 668.
9. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Baksht E.Kh., Yan P., Shut'ko Yu.V.* // Laser and Particle Beams. 2012. V. 30. P. 369.
10. *Бабич Л.П., Лойко Т.В.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. С. 287.
11. *Тарасенко В.Ф.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 444.
12. *Месяц Г.А., Яландин М.И., Реутова А.Г., Шарыпов К.А., Шпак В.Г., Шунайлов С.А.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 34.
13. *Костыря И.Д., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 1. С. 80.
14. *Tarasenko V.F., Rybka D.V., Burachenko A.G., Lomaev M.I., Balzovsky E.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. V. 83. P. 086106.
15. *Тарасенко В.Ф., Орловский В.М., Шунайлов С.А.* // Изв. вузов. Физика. 2003. № 3. С. 94.
16. *Tarasenko V.F., Shunailov S.A., Shpak V.G., Kostyrya I.D.* // Laser and Particle Beams. 2005. V. 23. P. 545.
17. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Burachenko A.G., Rybka D.V., Kostyrya I.D., Lomaev M.I., Baksht E.Kh., Yan P.* // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 053506.
18. *Гуревич А.В., Зыбин К.П.* // УФН. 2001. Т. 171. С. 1177.
19. *Tarasenko V.F.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 8. P. 081501.
20. *Тарасенко В.Ф., Любутин С.К., Рукин С.Н., Слобковский Б.Г., Костыря И.Д., Орловский В.М.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. С. 69.
21. *Shao T., Tarasenko V.F., Zhang C., Baksht E.Kh., Zhang D., Erofeev M.V., Ren C., Shut'ko Yu.V., Yan P.* // J. of Appl. Phys. 2013. V. 113. P. 093301.
22. *Ерофеев М.В., Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Шутько Ю.В.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. С. 52.
23. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Люблинский А.Г., Спичкин Г.Л.* // Приборы и техника эксперимента. 2012. Т. 55. С. 99.
24. *Alekseev S.B., Lomaev M.I., Rybka D.V., Tarasenko V.F., Shao T., Zhang C., Yan P.* // High Voltage Engineering. 2013. V. 39. P. 2112.
25. *Ерофеев М.И., Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. С. 43.
26. *Тарасенко В.Ф., Ерофеев М.В., Ломаев М.И., Сорокин Д.А., Рыбка Д.В.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 1001.
27. *Tarasenko V.F., Baksht E.K., Burachenko A.G., Lomaev M.I., Sorokin D.A.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2010. V. 38. P. 2583.
28. *Бакшт Е.Х., Тарасенко В.Ф., Ломаев М.И., Рыбка Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. С. 29.
29. *Бакшт Е.Х., Бураченко А.Г., Ломаев М.И., Рыбка Д.В., Тарасенко В.Ф.* // ЖТФ. 2008. Т. 78. С. 98.
30. Физическая энциклопедия. Т. 1. / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. энциклопедия, 1988.
31. *Ivanov S.N.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46. P. 285201.