

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

В.Ф. Тарасенко^{1,2}, Е.Х. Бакшт¹, А.Г. Бураченко¹, М.В. Ерофеев^{1,2}

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический, 2/3, Томск, 634055, Россия*

²*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр.
Ленина, 30, Томск, 634050, Россия
E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru*

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. Благодаря генерации УЭ и рентгеновского излучения при давлении одна атмосфера и более в воздухе и других газах формируются диффузные разряды. В работе [1] пучок УЭ, регистрируемый за анодом газового диода, было предложено называть сверхкороткий лавинный электронный пучок (с.л.э.п.).

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. Наибольшие 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, 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 промежуток в единицы килоампер в воздухе атмосферного давления наблюдается значительное уменьшение амплитуды с.л.э.п. при частотах > 10 Гц [2]. 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 [3].

Цель данной работы – исследовать параметры с.л.э.п. и экспозиционные дозы рентгеновского излучения в импульсно-периодическом режиме при разных длительностях фронта импульса напряжения.

В экспериментах использовалась разрядная камера, на которую подавались импульсы напряжения от генератора NPG-15/2000N. Генератор формировал импульсы напряжения с амплитудой до 35 кВ и частотой до 3.5 кГц. 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, благодаря которому длительность фронта импульса напряжения сокращалась до ~ 0.3 нс. Межэлектродный промежуток равнялся 12 мм. В работе использовался трубчатый катод из нержавеющей стали диаметром 6 мм. 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 [4] и защищала коллектор от попадания на него разрядной плазмы. В ряде экспериментов вторая сетка заменялась фольгой из алюминия толщиной 3 мкм или металлизированной (слой алюминия толщиной 0.2 мкм) пленкой из кимфоли ($C_{16}H_{14}O_3$) толщиной 2 мкм.

Для регистрации тока пучка применялся конический коллектор с диаметром приемной части 20 мм. Потери тока пучка в сетках и фольге при измерениях не учитывались. Временное разрешение коллектора и всей системы регистрации было не хуже 0.1 нс. Сигналы с емкостного делителя, установленного в разрядной камере, шунта и коллектора подавались на осциллограф DPO70604 (6 ГГц, 25 выборок за наносекунду). Рентгеновское излучение регистрировалось дозиметром Arrow-Tech, Inc (Model 138). Анодом вместо сетки в этом случае служила медная фольга толщиной 20 мкм. Свечение разряда фотографировалось фотоаппаратом Sony A100.

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 удается. 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. На рис. 1 приведены зависимости числа электронов в с.л.э.п. при различных частотах следования импульсов и двух напряжениях генератора от времени работы генератора. Изменение давления в газовой системе при работе генератора с максимальными параметрами составляло за 5 минут работы менее 10%. Каждая точка на рис. 1, кроме первой (которая соответствует первым импульсам с.л.э.п. после включения генератора), на данных зависимостях является усреднением по 128 импульсам. Видно, что при малой частоте (60 Гц) число электронов в с.л.э.п. возрастает, а затем за время ~ 60 секунд 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 наблюдаться как рост амплитуды с.л.э.п., так и ее уменьшение. При увеличении частоты диффузный характер разряда сохраняется, но форма разрядной области 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.

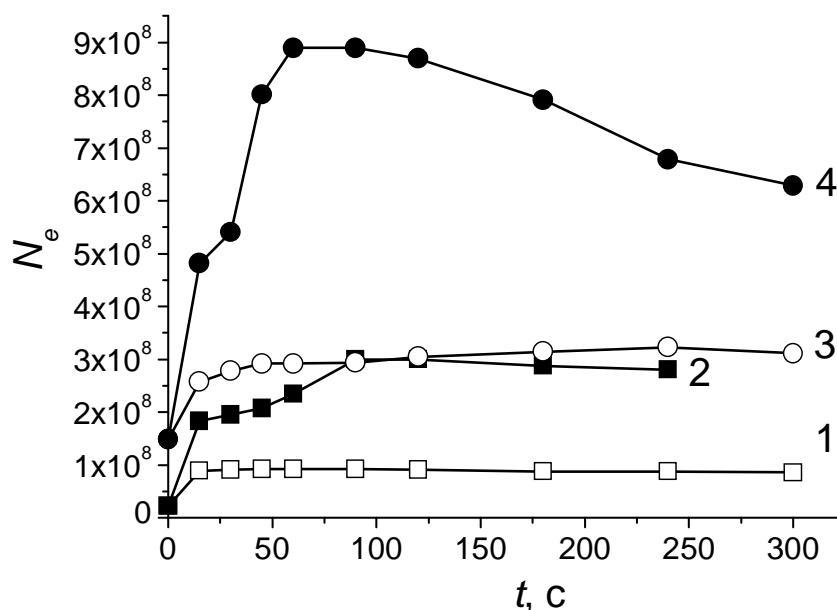


Рис. 1. Зависимость числа электронов в с.л.э.п. от времени для напряжения генератора 25 кВ при частотах 60 Hz (1) и 2000 Hz (2) и для напряжения 35 кВ при частотах 60 Hz (3) и 500 Hz (4).

Увеличение частоты следования импульсов приводит к уменьшению напряжения на 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. 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.

В импульсно-периодическом режиме было зарегистрировано изменение формы импульса напряжения и формы импульса с.л.э.п. 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. При работе в импульсно-периодическом

режиме момент пробоя промежутка стабилизировался, длительность импульса с.л.э.п. увеличивалась до 0.45-0.6 нс, а напряжение на промежутке уменьшалось.

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 был уменьшен до ~ 0.3 нс. Амплитуда с.л.э.п. увеличилась, а длительность импульса с.л.э.п. на полувывоте в импульсно-периодическом режиме уменьшилась до ~ 0.15 нс. Применение обострителя позволило увеличить давление азота, при котором регистрировался с.л.э.п. При работе с обострительным разрядником 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 при давлении 40 Торр. 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. Отметим, что без обострительного разрядника при давлении азота 90 Торр экспозиционная доза рентгеновского излучения уменьшалась более чем на порядок.

Проведенные исследования показали, что генерация с.л.э.п. является ординарным явлением и при высоких частотах следования импульсов. 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. за один импульс при частоте 3.5 кГц и напряжении генератора 25 кВ было наибольшим. 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. 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 в рамках государственного задания ИСЭ СО РАН по теме №13.1.3.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Ф. Тарасенко, В.М. Орловский, С.А. Шунайлов. *Известия ВУЗов. Физика.* **46**, 3 (2003) 94.
2. V.F. Tarasenko. *Appl. Phys Lett.* **8** (2006) 081501.
3. В.Ф. Тарасенко, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, И.Д. Костыря, В.М. Орловский. *ЖТФ.* **75**, 11 (2005) 69.
4. T. Shao, V.F. Tarasenko, C. Zhang, A.G. Burachenko, D.V. Rybka, I.D. Kostyrya, M.I. Lomaev, E.Kh. Baksht, P. Yan. *Rev. Sci. Instrum.* **84** (2013) 053506.