



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.8>

УДК: 621.387.3

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ НА КОММУТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ВЫСОКОВОЛЬТНОМ КОММУТАТОРЕ

П.А. Бохан, П.П. Гугин, Д.Э. Закревский, М.А. Лаврухин

**Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13**

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния частоты повторения импульсов на коммутационные характеристики составного газоразрядного коммутатора эпитрона, состоящего из секций полого катода и капилляра. Исследован диапазон частот 5-500 кГц при импульсном анодном напряжении до 30 кВ. Проведен сравнительный анализ межсекционного согласования условий зажигания и горения разряда при повышении частоты повторения импульсов и использовании предварительного разряда для повышения начальной концентрации электронов в катодной полости.

Ключевые слова: капиллярный разряд, плазменный катод, высоковольтный коммутатор, высокая частота, наносекундный импульс.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания FWGW-2025-0019 и при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00037 (<https://rscf.ru/project/24-19-00037>).

Автор для переписки: Гугин Павел Павлович, gugin@isp.nsc.ru

Введение

Генерация высоковольтных сильноточных импульсов при частоте повторения в десятки-сотни кГц является актуальной задачей [1] в таких областях как медико-биологические исследования и медицинская техника [2], физика импульсных газовых лазеров [3], плазмохимическая обработка летучих и жидких сред, в том числе отходов, и тд. [4-6] В этих областях повышение частоты повторения импульсов (ЧПИ) увеличивает мощность и производительность протекающих процессов. В то же время, например, для лазеров на самоограниченных переходах атомов и ионов критичным является сохранение в условиях повышенных частот фронта импульсов возбуждения длительностью $\sim 1-2$ нс [7]. В плазмохимических реакторах такой фронт позволяет сохранять объемный характер разряда в диапазоне давлений газовой среды вплоть до атмосферного [8]. Не менее значимым параметром является в этих задачах высокая эффективность процесса коммутации, поскольку нагрузка является низкоомной с заметной емкостной составляющей и чувствительной к напряжению. Это значит, что при низкой эффективности коммутатора потребуется чрезмерное повышение питающего напряжения для достижения требуемых выходных характеристик конечного устройства.

В работе [9] был представлен эптрон – высоковольтный коммутатор-обостритель наносекундного диапазона, обладающий микросекундным временем восстановления электрической прочности после коммутации тока в сотни-тысячи ампер. Особенность его конструкции заключается в использовании плазменного катода в качестве эмиттера электронов и протяженного (4-12 см) субмиллиметрового (0,1-0,5 мм) капилляра для замедления развития пробоя и ускорения восстановления электрической прочности разрядного промежутка. Основным недостатком такого устройства является сложный характер развития пробоя: из-за разной плотности плазмы в капилляре и катодной полости на их границе возникает потенциальная яма, что приводит к пробоям в две стадии с интервалом в 4-20 нс в зависимости от экспериментальных условий. При этом существенно возрастают стартовые потери эптрона. В работе [10] использован

дополнительный предварительный разряд (ПР) в катодной полости (КП), который, снижает скачек электронной плотности на выходе из капилляра за счет ее повышения в КП, вплоть до ее выравнивания. В результате при повышении энергии ПР уменьшается задержка между стадиями пробоя. Оптимизация энергии ПР и момента его зажигания позволяет добиться коммутации в энтроне в одну стадию. Это происходит при достижении оценочной концентрации электронов в ПР $n_{e0} \sim 10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$. Однако такой метод приводит к дополнительному нагреву устройства, поскольку энергия ПР рассеивается в катодной плазме. В то же время, КП является достаточно протяженной, чтобы плазма распадалась в ней относительно медленно. Характерное время рекомбинации плазмы по оценке [9] составляет десятки микросекунд. При этом максимум послесвечения в КП в [9] наблюдался через ~ 10 мкс после прохождения тока коммутации. Таким образом, можно ожидать, что при межимпульсном интервале в единицы микросекунд плотность катодной плазмы не будет существенно снижаться, что позволит отказаться от ПР без заметного снижения эффективности коммутации.

Целью настоящей работы является исследование влияния ЧПИ на коммутационные характеристики энтрона.

1. Экспериментальная установка

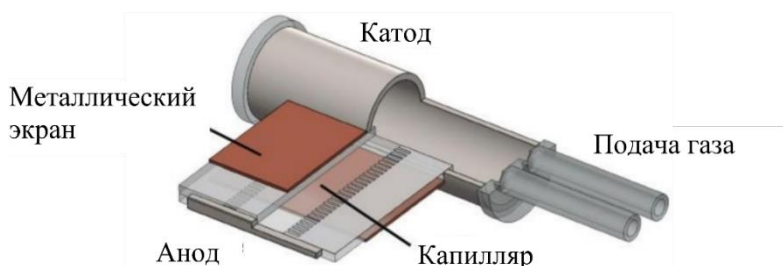


Рис. 1. Устройство энтрона.

Энтрон (Рис. 1) состоял из полого катода, выполненного из титановой трубки длиной 85 мм и внутренним диаметром 26 мм, к боковой поверхности которой был присоединен щелевой капилляр сечением 0.15×15 мм и длиной 60 мм, выточенный в кварцевой пластинке. Анод выполнен из титана. На внешней поверхности капилляра расположен медный экран, гальванически связанный

с потенциалом катода. Экран влиял на процесс рекомбинации плазмы в капиллярном канале и обеспечивал микросекундное время восстановления электрической прочности промежутка анод – КП после прохождения импульса тока. Давление рабочего газа гелия в эитроне, равное $p = 4\text{--}20$ Торр, устанавливалось в зависимости от напряжения и частоты повторения импульсов.

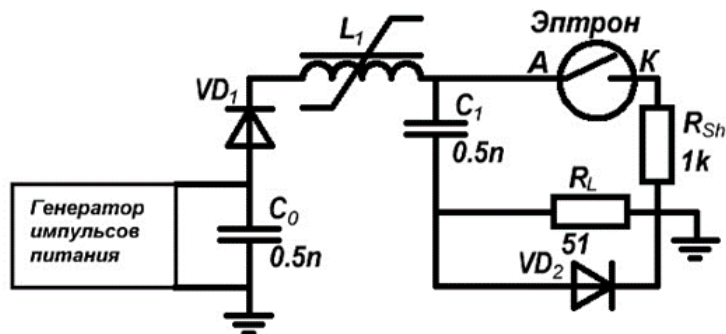


Рис. 2. Схема установки.

В работе был использован генератор импульсов питания аналогичный описанному в [11]. ЧПИ могла варьироваться в пределах 5-250 кГц при амплитуде импульса питания до 30 кВ. Для достижения ЧПИ 500 кГц были задействованы два таких генератора, включенных со сдвигом на половину такта. Каждый генератор обеспечивал зарядку рабочей емкости эитрона (Рис. 2) $C_1 = 500$ пФ за время 150-400 нс, которое подбиралось в зависимости от условий так, чтобы пробой происходил сразу после достижения амплитудного напряжения на его аноде. Эксперименты проводились в режиме цуга из 20 импульсов при частоте его повторения 10 Гц. Такой режим был выбран для того, чтобы избежать изменения условий внутри коммутатора в результате его нагрева, поскольку работа проводилась в режиме медленной прокачки газа и нагрев мог изменить концентрацию частиц в устройстве, вытеснив их в более холодные зоны газовой системы.

В качестве нагрузки R_L использовался набор малоиндуктивных резисторов типа ТВО-2 суммарным сопротивлением 51 Ом. Регистрация сигналов на аноде эитрона, нагрузке и тока разряда осуществлялась резистивными самокомпенсированными датчиками, изготовленными по рекомендациям [12], и имеющими полосу пропускания не хуже 1 ГГц для датчиков напряжения

и 0,5 ГГц для датчика тока. В работе использовался осциллограф Tektronix DPO3104 с полосой пропускания 1 ГГц.

2. Результаты эксперимента

На Рис 3 показаны характерные осциллограммы тока разряда при изменении ЧПИ в диапазоне 5-75 кГц при напряжении 20 кВ, нагрузке 51 Ом и давлении гелия 4 Торр. При ЧПИ 5 кГц хорошо видны две стадии пробоя. Можно предположить, что такая картина возникает вследствие того, что волна ионизации, двигаясь по капилляру от анода к КП, вызывает замыкание разрядного промежутка (первый пик), но на выходе из капилляра сталкивается с потенциальной ямой из-за низкой концентрации электронов (провал на осциллограмме). Далее, в зависимости от размеров и материала стенок катодной полости, давления и сорта рабочего газа, напряжения и ЧПИ, через несколько нс благодаря процессам вторичной эмиссии градиент концентрации электронов на выходе из капилляра выравнивается, и коммутация выходит на регулярный режим (второй пик тока): далее кривая разряда рабочей емкости не зависит о ЧПИ.

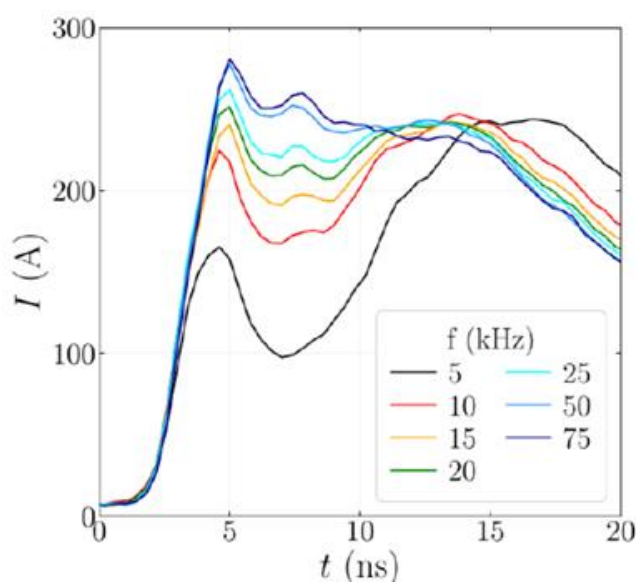


Рис. 3. Осциллограммы тока разряда.

При повышении ЧПИ глубина провала между пиками уменьшается, а расстояние между ними сокращается и при достижении ~50-70 кГц провал

вырождается до полки. С дальнейшим ростом ЧПИ картина сохраняется вплоть до 500 кГц. Итоговая эффективность коммутации в данных условиях, рассчитанная из отношения энергии, вложенной в нагрузку и запасенной в рабочей емкости эйтрона, достигает в среднем 75 % и повышается с напряжением.

Также была исследована работа эйтрона при ЧПИ до 500 кГц и напряжении питания до 30 кВ в схеме удвоения напряжения с изменением полярности при перезарядке емкостей [13]. Схема установки приведена на Рис.4. При этом было использовано два генератора импульса питания, работавших попеременно при ЧПИ 250 кГц. Каждый из них имел свою формирующую цепь $C_{0x}-L_{1x}$, развязанную между собой сборками быстрых диодов VD_{1x} . На Рис. 5 (а) приведены осциллограммы работы схемы: на емкости C_{01} (U_0), аноде эйтрона (U_1) и выходе удвоителя на емкости C_{11} (U_{out}). На Рис. 5 (б) приведен один из импульсов в увеличенном временном масштабе. Видно, что эффективность удвоения (осциллограмма U_0) достигает 80 %. Использование второго эйтрона в качестве обострителя удвоенного напряжения позволяет получить наносекундный фронт $\tau_f \sim 0.5-1.5$ нс при напряжении $U_{out} = 50-60$ кВ, ЧПИ 500 кГц и эффективности коммутации 60-80 % в зависимости от типа и номинала нагрузки.

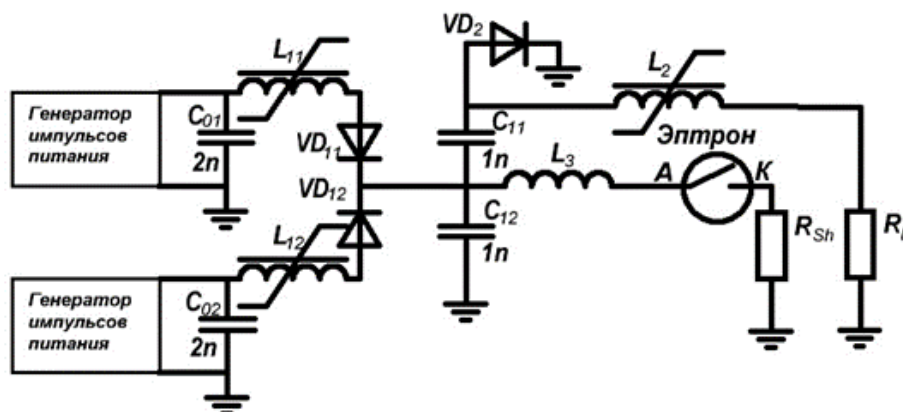


Рис. 4. Схема установки 500 кГц.

При сравнении результатов с работой [10], в которой рассмотрено влияние ПР на коммутационные характеристики эйтрона, видно, что при его введении эффективность коммутации относительно запасенной и вложенной в нагрузку

энергии может быть выше, даже при высоких ЧПИ, однако суммарный КПД эитрона, включающий в себя энергию, затраченную на ПР, будет ниже. Поэтому использование ПР может быть оправданным в случае низкой ЧПИ и при необходимости приложить к нагрузке максимальное напряжение относительно накопительной емкости эитрона с фронтом порядка $\tau_f \sim 0.5-1$ нс. Из этого можно предположить, как и в работе [9], в типичной конфигурации разрядного промежутка эитрона плотность плазмы в КП в течение 10-15 мкс меняется слабо, о чем говорит стабильность формы импульса тока при ЧПИ выше 70 кГц. При этом, ПР может создать в зоне возле входа в капилляр более плотную плазму, приближенную к плотности плазмы на фронте волны ионизации в капилляре, что и объясняет более высокую эффективность коммутации, вплоть до полного отсутствия не только провала после первого пика тока, но даже полной коммутации в одну стадию с эффективностью до 90 %.

Математическое моделирование разряда в эитроне, выполненное в гидродинамическом приближении методом Монте-Карло показывает, что концентрация электронов в течение импульса тока может достигать $n_{e0} = 10^{13}-10^{14} \text{ см}^{-3}$, что немного ниже оценочной концентрации в ПР: до $n_{e0} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ [10]. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в этой работе.

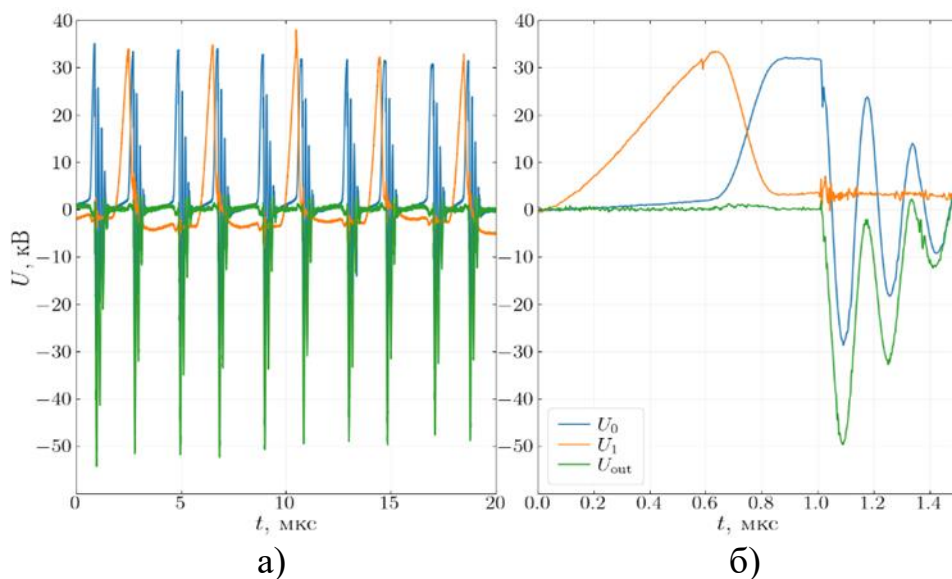


Рис. 5. Осциллограммы работы эитрона: а) 5 мкс/дел, б) 200 нс/дел.

Заключение

В данной работе продемонстрирована эффективная коммутация составным газоразрядным устройством – эптоном- в диапазоне частот до 500 кГц при амплитуде импульса питания до $U_0 = 30$ кВ с наносекундным фронтом напряжения на нагрузке. Показано, что благодаря накоплению плотности плазмы в КП при частоте выше 70 кГц использование предварительного разряда для повышения начальной концентрации электронов n_{e0} в КП можно исключить без заметной потери коммутационных характеристик в более высоком диапазоне частот.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания FWGW-2025-0019 и при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00037 (<https://rscf.ru/project/24-19-00037>)

Литература

1. Akiyama H., Sakugawa T., Namihira T., Takaki K., Minamitani Y., Shimomura N. Industrial Applications of Pulsed Power Technology // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. – 2007. – V. 14. – № 5. – P. 1051. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.4339465>
2. Abadi M.R.Q.R., Marzebali M.H., Abolghasemi V., Anisi M.H. High-Voltage Pulse Generators for Electroporation Applications: A Systematic Review // IEEE Access. – 2022. – V. 10. – P. 64933. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3184015>
3. Trigub M. V., Troitskii V. O., Karasev N. V. Atypical excitation mode of CuBr+ Ne and CuBr+ Ne+ HBr active media // Optical and Quantum Electronics. – 2023. – V. 55. – № 10. – P. 873. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05086-z>
4. Guo X., Zheng D., Blaabjerg F. Power Electronic Pulse Generators for Water Treatment Application: A Review// IEEE Trans. Power Electron. – 2020. – V. 35. – № 10. – P. 10285. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2976145>

5. Beckers F. J. C. M., Hoeben W. F. L. M., Huiskamp T. et al. Pulsed Corona Demonstrator for Semi-Industrial Scale Air Purification// IEEE Trans. Plasma Sci. – 2013. – V. 40. – № 10. – P. 2920. <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2275035>
6. Chanturia V. A., Bunin I. Z., Ryazantseva M. V. et al. Modification of Structural, Chemical and Process Properties of Rare Metal Minerals under Treatment by High-Voltage Nanosecond Pulses// J. Min. Sci. – 2018. – V. 53. – P. 718. <https://doi.org/10.1134/S1062739117042704>
7. Bokhan P. A., Gugin P. P., Zakrevskii Dm. E. et al. Frequency and energy characteristics of a Cu – Ne laser at different durations of the leading edge of the excitation pulse // Quantum Electron. – 2019. – V. 49. – № 8. – P. 749. <https://doi.org/10.1070/QEL16987>
8. Бохан П. А., Гугин П. П., Закревский Д. Э. и др. Исследование параметров объемного газового разряда высокого давления при частоте следования импульсов до 100 kHz // Письма в ЖТФ. – 2024. – Т. 50. – № 19. – С. 9. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.19.58648.19992>
9. Bokhan, P. A., Gugin, P. P., Lavrukhin, M. A. et al. A high-voltage subnanosecond sharpener based on a combination of ‘open’ and capillary discharges //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2018. – V. 51. – № 36. – P. 364001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad351>
10. Бохан П. А., Гугин П. П., Закревский Д. Э. и др. Механизм субнаносекундной коммутации в ээтроне // Письма в Журнал технической физики. – 2025. – Т. 51. – № 12. – С. 33-37. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2025.12.60611.20238>
11. Bokhan P. A., Gugin P. P., Lavrukhin M. A. et al. Pulse-periodic gas discharge in atmospheric pressure helium with nanosecond excitation fronts //Physics of Plasmas. – 2023. – V. 30. – № 10. – P. 103506. <https://doi.org/10.1063/5.0164607>
12. Белкин В. С., Шульженко Г. И. Формирователи мощных наносекундных и пикосекундных импульсов на полупроводниковой элементной базе. Препринт ИЯФ им. Г. И. Будкера.- Новосибирск, 1991. –35 с.

13. Fitch R. A., Howell V. T. S. // Proceed. of the Institution of Electrical Engineers., IET Digital Library. – 1964. – V. 111. – № 4. – P. 849.
<https://doi.org/10.1049/piee.1964.0139>

Для цитирования:

Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А. Влияние частоты повторения импульсов на коммутационные характеристики в высоковольтном коммутаторе. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.8>