

УДК 537.5

## Исследование коммутационных свойств эптона — наносекундного обострителя на основе комбинации «открытого» и капиллярного разрядов

П.А. Бохан<sup>1</sup>, П.П. Гугин<sup>1</sup>, Дм.Э. Закревский<sup>1,2</sup>, М.А. Лаврухин<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет  
630073, г. Новосибирск, пр. Маркса, 20

Поступила в редакцию 26.12.2017 г.

Исследованы коммутационные свойства нового газоразрядного обострителя, состоящего из последовательно соединенных и находящихся в одном объеме «открытого» и капиллярного разрядов. В гелии получены времена коммутации менее 1 нс в широком диапазоне условий при временах задержки развития разряда, превышающих 600 нс, со степенью компрессии исходного импульса  $\sim 10^3$ . Реализована средняя мощность  $\sim 10$  кВт в режиме цуга импульсов при напряжении 20 кВ и частоте следования импульсов 44 кГц.

*Ключевые слова:* газовый разряд, обостритель, коммутация, наносекунды; gas discharge, sharpener, switching, nanosecond.

### Введение

Генераторы импульсов с субнаносекундным временем нарастания находят широкое применение в современной науке и технике [1–4]. Основным элементом в таких генераторах является ключ — устройство, способное переходить в высокопроводящее состояние за время менее 1 нс. Обычно используется импульсное питание, и в этом случае ключ выполняет функции обострителя. Существующие устройства работают на основе разных физических принципов и в совокупности обеспечивают широкий диапазон выходных характеристик (время нарастания переднего фронта, рабочее напряжение, частота следования импульсов, длительность и амплитуда тока и т.д.). Тем не менее их параметры не перекрывают всех потребностей силовой электроники, ускорительной техники, лазерной физики, сверхширокополосной радиолокации и пр. Поэтому продолжают интенсивные исследования и разработка, в частности, устройств, функционирующих при высоких частотах следования импульсов (десятки кГц), с большой средней мощностью, высокой степенью компрессии исходного импульса и т.д.

Перспективным представляется исследование коммутационных процессов в «открытом» разряде с генерацией встречных электронных пучков, разработка устройств на их основе (кивотронов [5]) и применение последних в приборах для генериро-

вания высоковольтных импульсов. Кивотрон может коммутировать импульсы до 100 кВ [6] с субнаносекундным ( $\sim 100$  пс) фронтом нарастания [7] и работоспособен до частот следования импульсов в десятки кГц [8]. Экспериментальные исследования и моделирование показали, что на скорость развития «открытого» разряда основное влияние оказывает резонансное излучение быстрых атомов, линия излучения которых сильно сдвинута относительно центра линии излучения малоподвижных (с тепловой скоростью) атомов, заполняющих газовый промежуток. Процесс также может ускоряться за счет вторичной электрон-электронной эмиссии с катода [9–11]. Использование кивотрона, например, в качестве коммутатора в системах питания лазеров позволило повысить частоту следования импульсов накачки, среднюю мощность и эффективность генерации лазеров на самоограниченных переходах атомов [12]. Вызывают интерес возможности его применения в других областях, в частности в системах магнитного управления отклонения релятивистских электронных пучков [13, 14], высокочастотных генераторов гигагерцового диапазона [15] и т.д.

Увеличение напряжения и давления рабочего газа в кивотронах с коаксиальной и планарной геометрией приводит к уменьшению типичного времени коммутации [7, 9]. В работе [8] показано, что при использовании в качестве рабочего газа чистого водорода при давлении  $\sim 0,5$  торр кивотрон сохраняет коммутирующие свойства до частоты следования импульсов  $\sim 100$  кГц. Однако при ее повышении электрическая прочность разрядного промежутка снижается. Вследствие увеличения начальной концентрации электронов, т.е. из-за недостаточной

\* Петр Артемьевич Бохан (bokhan@isp.nsc.ru); Павел Павлович Гугин (gugin@isp.nsc.ru); Дмитрий Эдуардович Закревский (zakrdm@isp.nsc.ru); Максим Александрович Лаврухин (lavrukhin@isp.nsc.ru).

скорости рекомбинации плазмы в разрядном промежутке, определяемой скоростью амбиполярной диффузии [16], происходят снижение рабочего напряжения и уменьшение задержки развития разряда. Для ускорения диффузии при сохранении длины промежутка и, следовательно, рабочего напряжения, необходимо, вне зависимости от состава рабочей среды, уменьшать ее давление. Это снижает скорость наработки быстрых атомов из-за возрастания доли потерь на анодной сетке, разделяющей разрядные промежутки, что и приводит к увеличению времени пробоя и к снижению степени компрессии исходного импульса. Поэтому для развития устройств подобного типа, в частности для сохранения коммутационных характеристик при увеличении частоты следования, необходимо увеличить время задержки развития разряда.

В настоящей работе описана конструкция и представлены результаты исследования коммутирующего устройства, развивающего концепцию кивотрона. Новое устройство состоит из «открытого» и капиллярного разрядов, интегрированных в одном рабочем объеме. Устройство прибора, схема генератора импульсов первичного питания и измерений основных параметров представлены на рис. 1. Прибор представляет собою коаксиальную кювету с разрядным промежутком катод – сетчатый анод (обычный кивотрон [9, 10]), в которой формируется «открытый» разряд, генерирующий сходящийся и одновременно осциллирующий электронный пучок. Внутренний диаметр катода 1 – 50 мм, длина – 70 мм, расстояние между катодом и сетчатым анодом кивотрона 2 с геометрической прозрачностью ~90% составляет 3 мм. Со стороны одного из торцов коаксиальной кюветы подсоединена капиллярная структура 4, с внешней стороны которой установлен анод 5. В общем случае кивотрон и капиллярная структура могут иметь как коаксиальную, так и планарную геометрии. В нашем случае экспе-

рименты проводились с коаксиальной конструкцией длиной 35 мм, состоящей из перемежающихся  $Al_2O_3$  колец толщиной 1 мм с отверстием с внутренним диаметром 1 и 4,5 мм. Такое устройство капилляра предотвращает развитие разряда по поверхности.

Импульсное отрицательное напряжение – исходный импульс – генерируется с помощью тиратрона ТГИ 1-1000/25, прикладывается к катоду, а анод прибора 5 заземляется через токоизмерительный омический шунт с  $R_{sh} = 0,33 \Omega$ . Анод кивотрона 2 имеет малоиндуктивный вывод, что позволяет регистрировать его потенциал и подсоединять к нему элементы электрической цепи. Все потенциалы измерялись с помощью омических делителей и подавались на вход осциллографа Tektronix DPO 70804C с полосой 8 ГГц. Нагрузкой  $R_L$  служили наборы малоиндуктивных сопротивлений серии EY (Ohmite), изменяемых в пределах  $R_L = 29–330 \Omega$ . Рабочая емкость  $C_1$  составлена из двух последовательно соединенных конденсаторов емкостью  $C_{11} = 0,66–1,15$  и  $C_{12} = 3,0–9,4$  нФ. Вывод из места их соединения можно подключать к выводам анода кивотрона 2. Использовался импульсный заряд емкости  $C_1$ , что позволило в цуге из 10 импульсов работать до частоты заполнения  $f = 44$  кГц, определяемой предельной частотой функционирования первичного коммутатора. Рабочее напряжение достигало 24 кВ, а средняя мощность в цуге – 10 кВт.

Исследовались несколько схем включения: 1) сетка – анод кивотрона – находится под плавающим потенциалом; 2) на анод кивотрона каким-либо образом подается напряжение положительной полярности.

Типичный пример осциллограмм напряжений на нагрузке  $U_L$ , на катоде кивотрона  $U_c$ , на сетке – аноде кивотрона  $U_g$  в схеме, когда она находится под плавающим потенциалом (сетка – анод – заземлена через омический делитель  $R_a = 15$  кΩ),

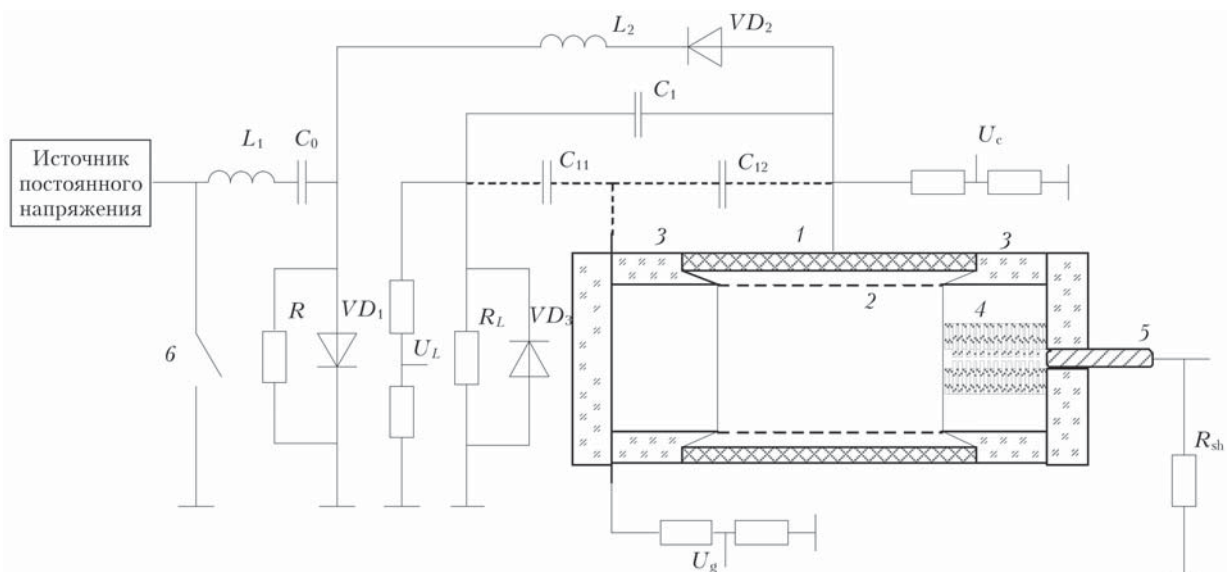


Рис. 1. Конструкция прибора, схема генератора импульсов первичного питания и измерения основных параметров: 1 – катод; 2 – сетка кивотрона; 3 – изолятор; 4 – капиллярная структура; 5 – анод; 6 – первичный коммутатор ТГИ 1-1000/25

и тока  $I$  через нагрузку при  $f = 20$  кГц приведены на рис. 2 (показан 10-й импульс; начиная со 2-го импульса в цуге параметры последующих импульсов идентичны).

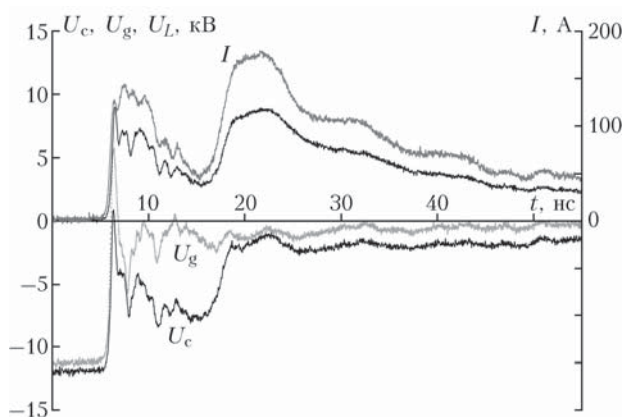


Рис. 2. Осциллограммы импульсов  $U_L$ ,  $U_c$ ,  $U_g$  и  $I$  ( $C_1 = 0,55$  нФ,  $f = 20$  кГц,  $p_{He} = 10$  торр)

Зажигание разряда вначале осуществляется между анодом устройства 5 и сетчатым анодом кивотрона 2, что идентифицируется по сбросу напряжения на капилляре  $U_{cap} = U_g - IR_{sh}$  до нескольких сотен вольт. Затем, в зависимости от действующего напряжения, давления гелия и частоты следования импульсов в цуге, через 10–20 нс зажигается разряд между анодом устройства 5 и катодом кивотрона 1. На нагрузке, как и на токоизмерительном шунте, регистрируются два пика напряжения с характерным временем нарастания 0,5–2,0 нс. Первый пик соответствует развитию разряда между анодом прибора и сеткой кивотрона и приводит к возникновению разности потенциалов между сеткой и катодом, которые образуют паразитную емкость величиной 40 пФ. При достижении определенной разности потенциалов развивается разряд в кивотроне, что окончательно замыкает цепь с характерным временем спада напряжения на рабочей емкости  $\tau = R_L C_{12}$ . Глубина провала между первым и вторым пиками уменьшается с ростом частоты следования и при  $f = 40$  кГц составляет 30–40% от амплитудного напряжения. Это объясняется уменьшением времени задержки развития разряда с ростом  $f$  [6, 9], которое, в свою очередь, определяется степенью рекомбинации плазмы в кивотроне [16].

Для накачки импульсных лазеров на самоограниченных переходах наличие двух пиков напряжения неприемлемо. Для устранения первого пика необходимо, чтобы первоначально зажегся разряд в кивотроне. В настоящей работе были применены две схемы. В первой схеме на сетку кивотрона подавалось напряжение от другого импульсного источника. При таком включении катод заземлялся, а на анод кивотрона и анод прибора подавалось напряжение положительной полярности. Во второй схеме на анод кивотрона подавалось напряжение от емкостного делителя, составленного из конденсаторов  $C_{11}$  и  $C_{12}$ . В этом случае импульсное напряжение автоматически делится между емкостями, т.е.

кивотроном и капилляром, тем самым осуществляется режим, когда первоначально зажегается разряд в кивотроне. Оба метода поджига кивотрона дают близкие результаты, однако во втором обеспечить функционирование прибора в моноимпульсном режиме значительно проще.

На рис. 3, а приведены осциллограммы напряжения на катод  $U_c$ , на аноде кивотрона  $U_g$  и на нагрузке  $U_L$  для случая, когда  $C_{11} = 1,15$  и  $C_{12} = 3,3$  нФ,  $f = 5$  кГц, давление гелия  $p_{He} = 7$  торр. Видно, что на осциллограмме  $U_c$  возникает излом, который обусловлен зажиганием разряда в кивотроне и быстрым разрядом емкости  $C_{12}$  через газоразрядный промежуток между сеткой и катодом.

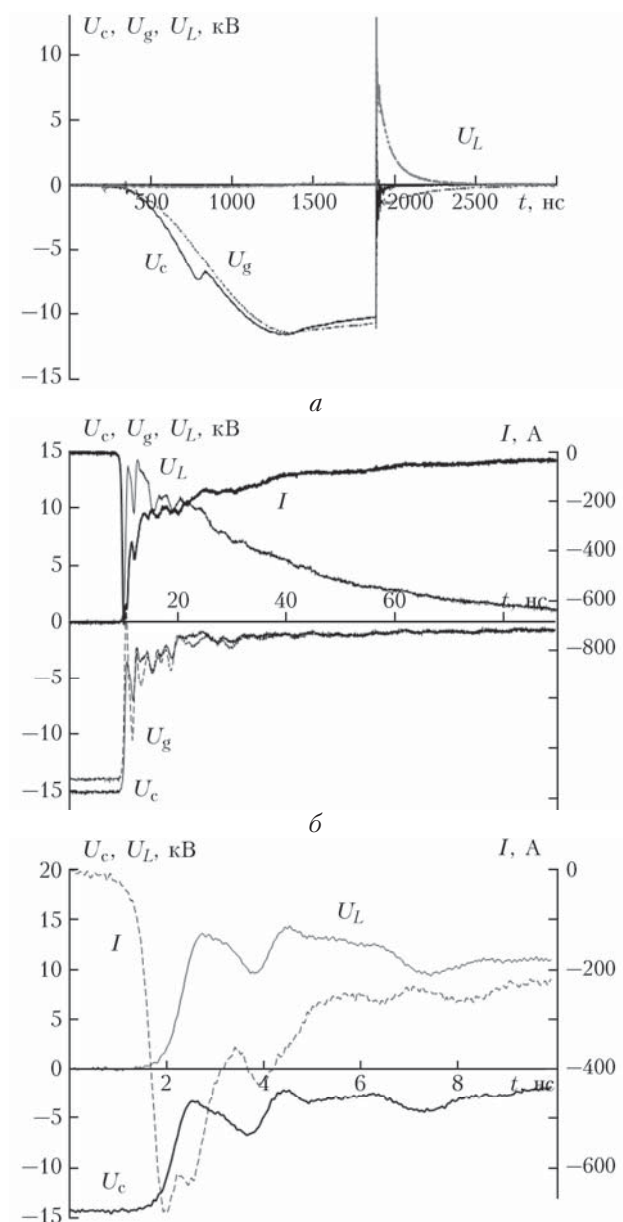


Рис. 3. Осциллограммы импульсов  $U_L$ ,  $U_c$  и  $U_g$  ( $C_{11} = 1,15$  нФ,  $C_{12} = 3,3$  нФ,  $f = 5$  кГц,  $p_{He} = 7$  торр) (а);  $U_L$ ,  $U_c$ ,  $U_g$  и  $I$  ( $R_L = 50$  Ω,  $C_{11} = 0,66$  нФ,  $C_{12} = 3$  нФ,  $f = 22$  кГц,  $p_{He} = 10$  торр) (б);  $U_L$ ,  $U_c$  и  $I$  ( $R_L = 50$  Ω,  $C_{11} = 0,66$  нФ,  $C_{12} = 3$  нФ,  $f = 22$  кГц,  $p_{He} = 10$  торр) (в)

Образующаяся плазма шунтирует емкость  $C_{12}$ , и все напряжение прикладывается к капилляру. Этот момент никак не отражается на осциллограмме напряжения на нагрузке. При увеличении  $U$ ,  $f$  или  $p_{\text{He}}$  ускоряется пробой между сеткой – анодом и катодом, поэтому излом сдвигается к началу импульса и при  $f \approx 30$  кГц и  $U > 15$  кВ практически незаметен, что обусловлено высокой предимпульсной проводимостью кивотрона. Через некоторое время осуществляется пробой капилляра и устройство срабатывает как газоразрядный коммутатор. После пробоя падение напряжения на ключе делится между капилляром и кивотроном, причем большая часть приходится на последний. При  $p_{\text{He}} \geq 10$  торр падение напряжения на капилляре составляет не более 400 В, и поэтому разница в осциллограммах с устройства в целом и сетки кивотрона практически исчезает. На рис. 3, б, в с разным временным масштабом приведены осциллограммы напряжения на катоде и аноде кивотрона и на нагрузке  $R_L = 50 \Omega$  и тока  $I$  через нее после пробоя капилляра для случая, когда  $C_{11} = 0,66$  и  $C_{12} = 3$  нФ,  $f = 22$  кГц,  $p_{\text{He}} = 10$  торр. Две особенности характеризуют развитие разряда. Первая состоит в том, что амплитуда тока, регистрируемая с помощью шунта, превышает величину  $I = U_L/R_L$ , что объясняется его прохождением через паразитные (паразитные) емкости ключа  $C_p$  и нагрузки. Поэтому амплитуда первоначального пика практически не зависит от  $R_L$ , а разница между ней и последующим пиком тока, который спадает с постоянной времени  $\tau \sim R_L C_{11}$ , возрастает. На осциллограмме  $U_L$  это вызывает в первые 4–5 нс колебания, которые уменьшаются при уменьшении индуктивности нагрузки и паразитных емкостей. Период колебания ( $\sim 1,5$  нс) определяется из величины  $T = 2\pi(LC_c)^{1/2}$ , где расчетная индуктивность разрядного контура  $L \approx 30$  нГн и емкость прибора  $C_c \approx 2$  пФ. Схемными решениями удастся уменьшить глубину колебаний до  $\sim 10\%$  при  $U = 20$  кВ.

На рис. 4, а для этого случая показаны зависимости времени задержки полного пробоя  $\tau_d$  (от уровня 0,1 до пробоя) от частоты заполнения цуга  $f$  при  $R_L = 50 \Omega$  и  $U = 20$  кВ, а на рис. 4, б – зависимости времени пробоя  $\tau_s$  (по уровню 0,1–0,9), т.е. времени сброса напряжения на электродах устройства, от  $f$  при разных  $p_{\text{He}}$  и  $U$  (как и для предыдущего способа включения емкости  $C_1$ , начиная со 2-го параметры всех последующих импульсов идентичны). Из рис. 4, а, б видно, что вплоть до  $f \approx 44$  кГц сохраняется значительное время задержки, более чем на порядок превышающее задержку пробоя в кивотроне в смесях  $\text{He} + \text{H}_2$  и чистом  $\text{H}_2$  [7, 8]. Время коммутации слабо зависит от рабочего напряжения (в диапазоне 10–20 кВ), давления гелия, частоты следования и во всех случаях  $\tau_s < 1$  нс. На рис. 4, в приведены вычисленные на основании полученных результатов зависимости степени компрессии импульсов  $S = \tau_d/\tau_s$  для давления гелия  $p_{\text{He}} = 5; 7$  и 10 торр при  $U = 20$  кВ. Видно, что во всем диапазоне исследованных условий обеспечивается  $S = 800$ –1100, что на порядок

превышает данную величину в кивотроне [6]. Это существенно облегчает работу первичного генератора импульсов, в котором можно использовать транзисторы в качестве первичных ключей. Отметим также, что время коммутации близко к предельному для кивотрона с кюветой диаметром 50 мм ( $\tau_s \approx 620$  пс) [9].

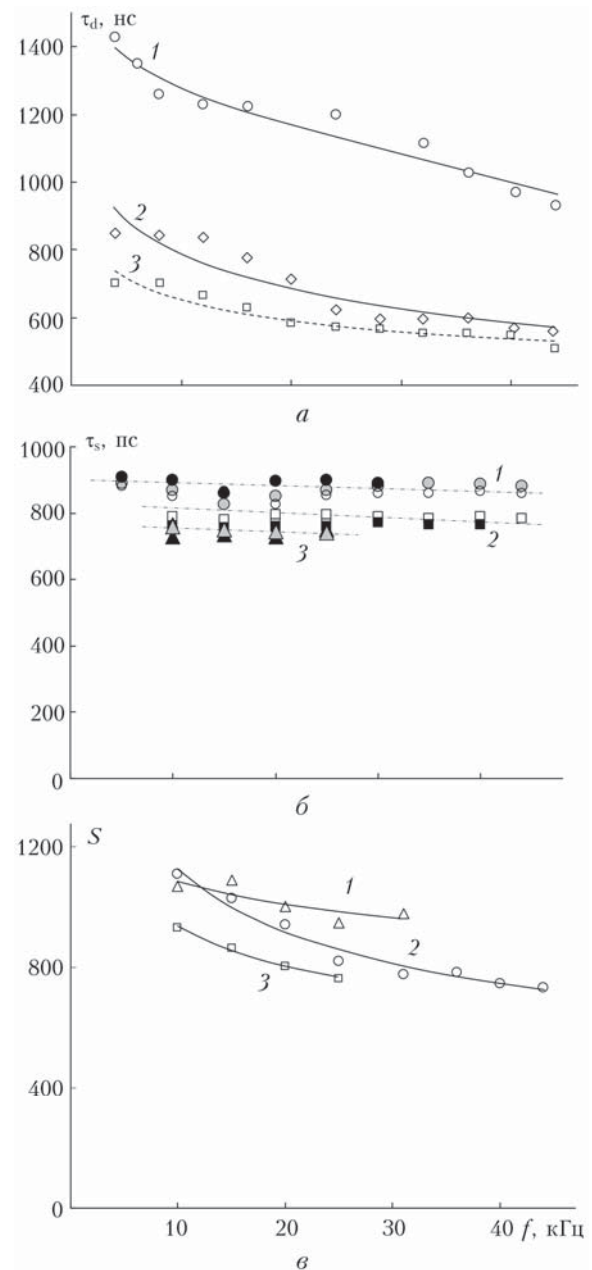


Рис. 4. Зависимость от  $f$  задержки времени пробоя  $\tau_d$  ( $R_L = 50 \Omega$ ,  $U = 20$  кВ) при  $p_{\text{He}} = 4$  (1), 7 (2) и 10 торр (3) (а); времени пробоя  $\tau_s$  при  $U = 14$  (белые символы), 17 (серые символы), 20 кВ (черные символы),  $p_{\text{He}} = 5$  (1), 7 (2) и 10 торр (3) (б); степени компрессии импульсов  $S$  при  $p_{\text{He}} = 4$  (1), 7 (2) и 10 торр (3) ( $U = 20$  кВ) (в)

Из полученных результатов обращает на себя внимание значительное увеличение времени задержки развития разряда более, чем на порядок



превышающее эту величину в кивотроне. С одной стороны, это объясняется тем, что благодаря малому диаметру капилляра осуществляется быстрая нейтрализация газа в течение междимпульсного интервала. С другой стороны, развитие разряда в последующем импульсе начинается при малой концентрации электронов, при которой время их свободной диффузии к стенке  $\sim 10$  нс. Это сдерживает быстрое их размножение в начале импульса напряжения. При накоплении определенной концентрации электронов  $n_e$ , при которой дебаевский радиус экранирования становится меньше радиуса капилляра, а диффузия становится амбиполярной ( $n_e > 10^{10} \text{ см}^{-3}$ ), рост их концентрации резко ускоряется и в дальнейшем зависит от коэффициента Таунсенда размножения электронов  $\alpha$  и их дрейфовой скорости  $v_d$ . При приведенной напряженности электрического поля в начале пробоя  $E/N \approx (2-4) \cdot 10^{-14} \text{ В} \cdot \text{см}^2$  ( $E$  — напряженность электрического поля;  $N$  — концентрация атомов)  $\alpha$  слабо зависит от величины  $E/N$  [17]. При таких  $E/N$  дрейфовая скорость электронов  $v_d \sim 5 \cdot 10^8 \text{ см/с}$ . Если за характерное время пробоя по уровню 0,1–0,9 принять время прохождения электроном дистанции, на которой он в результате размножения приведет к появлению девяти новых электронов, то время пробоя равно  $\tau_s = \alpha N \ln 9 / v_d \sim 0,6 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . Учитывая заметную неопределенность величин  $\alpha$  и  $v_d$  в наших условиях, можно считать, что предложенная модель дает близкие к эксперименту результаты.

Таким образом, экспериментально показано, что в обострителе на основе комбинации «открытого» и капиллярного разрядов достижимы субнаносекундные времена коммутации при ее высокой эффективности. Устройства подобного типа способны функционировать при высокой частоте следования импульсов (десятки кГц), и для них характерны значительные времена задержки развития разряда, что предопределяет большие степени компрессии исходного импульса (800–1000). Предлагается называть это устройство «эптрон» — электронно-пучковый с торцевым разрядом обостритель напряжения.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 14-19-00339).

1. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
2. *Месяц Г.А., Яландин М.И.* Пикосекундная электроника больших мощностей // Успехи физ. наук. 2005. Т. 17, № 3. С. 225–246.
3. *Merensky L.M., Kardo-Sysoev A.F., Flerov A.N., Pokryvailo A., Shmilovitz D., Kesar A.S.* A low-jitter 1.8-kV 100-ps rise-time 50-kHz repetition-rate pulsed-power generator // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37, N 9. P. 1855–1862.

4. *Тарасенко В.Ф.* Генерация убегающих электронов и рентгеновского излучения в разрядах повышенного давления. Томск: STT, 2015. 568 с.

5. *Плазменный коммутатор*: Пат. 2528015. Россия, МПК; H01J 17/02 H01P 1/14. Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.; Ин-т физ. полупроводников СО РАН. 20131110555/07; Заявл. 11.03.2013; Оpubл. 10.09.2014. Бюл. № 5.

6. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* Коммутация 100 kV импульсов в планарном «открытом» разряде с генерацией встречных электронных пучков // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43, вып. 20. С. 37–45.

7. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* Развитие разряда и минимальное время коммутации в кивотроне // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 43, вып. 7. С. 73–80.

8. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* Исследование частотных и коммутационных характеристик планарных обострителей на основе открытого разряда со встречными электронными пучками // Изв. вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 9/2. С. 75–78.

9. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* Генерация высоковольтных импульсов с субнаносекундным фронтом нарастания в «открытом разряде». I Конструкции и результаты экспериментальных исследований коммутационных характеристик // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 10. С. 50–57.

10. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Лаврухин М.А.* Генерация высоковольтных импульсов с субнаносекундным фронтом нарастания в «открытом разряде». II Механизм коммутации // ЖТФ. 2015. Т. 85, вып. 10. С. 58–63.

11. *Швейгерт И.В., Александров А.Л., Бохан П.А., Закревский Д.Э.* Пробой в гелии в высоковольтном открытом разряде с субнаносекундным фронтом нарастания тока // Физика плазмы. 2016. Т. 42, № 7. С. 658–670.

12. *Бохан П.А., Гугин П.П., Закревский Д.Э., Казарян М.А., Лаврухин М.А., Лябин Н.А.* Влияние уменьшения длительности фронта импульса напряжения на частоту следования импульсов генерации лазера на парах меди // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 8. С. 715–719.

13. *Gambaryan V., Starostenko A.* Fast kicker // Proc. of 6th International Particle Accelerator Conference IPAC. 2015, USA. P. 1001–1003.

14. *Gambaryan V., Starostenko A.* Fast kicker for high current beam manipulation in large aperture // Proc. of CERN-BINP Workshop for Young Scientists in  $e^+e^-$  Colliders, 22–25 August, 2016. Geneva, Switzerland. P. 207.

15. *Kekez M.M.* Microwave generation in air and vacuum // IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. V. 45, N 2. P. 235–246.

16. *Александров А.Л., Швейгерт И.В.* Моделирование послесвечения плазмы в разрядном промежутке субнаносекундного коммутатора на открытом разряде // Физика плазмы. 2018. Т. 44. (в печати).

17. *Ткачев А.Н., Яковленко С.И.* Механизм убегающих электронов в газе и критерий зажигания самостоятельного разряда // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29, вып. 16. С. 54–62.

*P.A. Bokhan, P.P. Gugin, D.E. Zakrevsky, M.A. Lavrukhin. Switching properties of eptron – the nanosecond sharpener based on the combination of “open” and “capillary” discharges.*

The switching properties of a new gas-discharge sharpener that consists of “open” and “capillary” discharges serially connected in a bulk are studied. The switching times less than 1 ns have been attained in helium in a wide range of conditions, at times of discharge development delay higher than 600 ns with an initial pulse compression degree of about  $10^3$ . An average power of about 10 kW has been implemented in the pulse train mode at a voltage of 20 kV and a pulse frequency of 44 kHz.