

УДК 537.529

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ НЕУПРАВЛЯЕМЫЙ РАЗРЯДНИК НОВОГО ТИПА ДЛЯ НАНОСЕКУНДНОЙ КОММУТАЦИИ МЕГААМПЕРНЫХ ТОКОВ

© 2022 г. Е. А. Галанова<sup>1</sup>, Ю. Н. Долин<sup>1</sup>, А. В. Ивановский<sup>1,2</sup>, А. Е. Калинычев<sup>1,2</sup>,  
Г. В. Карпов<sup>1,2,\*</sup>, С. С. Ломтев<sup>1,2</sup>, А. Г. Мерзлов<sup>1</sup>, В. Н. Нудиков<sup>1</sup>, Д. С. Прохоров<sup>1</sup>,  
Е. А. Салатов<sup>1,2</sup>, А. Н. Туров<sup>1</sup>, А. А. Шаталин<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН С.Г. Гараниным 04.07.2022 г.

Поступило 04.07.2022 г.

После доработки 04.07.2022 г.

Принято к публикации 06.07.2022 г.

Разработан многоканальный неуправляемый разрядник, основанный на поэтапном пробое многослойного пленочного изолятора с вложенной фольговой пластиной, находящейся под плавающим потенциалом. Резкое изменение потенциала фольги после одноканального начального самопробоя между фольгой и одним из электродов приводит к многоканальному вторичному пробоею между фольгой и другим электродом. В местах пробоя генерируются кумулятивные плазменные струи, инициирующие формирование сквозных токовых каналов между электродами на третьем этапе пробоя. Разработанный многоканальный разрядник обладает наносекундным временем срабатывания и может быть применен для обострения фронта импульса напряжения в электроразрядных устройствах с мегаамперными токами. Аналогичный способ формирования многоканального пробоя может использоваться при разработке наносекундных коммутаторов мультимегаамперных токов по направлениям термоядерных исследований с применением взрывомагнитных генераторов энергии.

*Ключевые слова:* твердотельный разрядник, пленочный изолятор, электрический пробой, наносекундное срабатывание, токовые каналы

DOI: 10.31857/S2686740022070045

### ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах по некоторым направлениям электрофизических термоядерных исследований [1, 2] с использованием взрывомагнитных генераторов [3] существует необходимость наносекундной коммутации мультимегаамперных токов. Фундаментальной основой для создания соответствующих коммутационных устройств могли бы быть неуправляемые твердотельные разрядники [4], которые в простейшем варианте можно представить в виде плоскопараллельных электродов, разделенных изолятором. Места самопробоя задаются с помощью различного рода электродных неоднородностей, создающих локальные возмущения распределения электрического поля. Максимальное число каналов пробоя, совпадающее с

числом неоднородностей, может быть получено, согласно [4], при достаточно высоких скоростях роста напряжения между электродами,

$$\frac{dU}{dt} > 10^{12} \text{ В/с.} \quad (1)$$

Неравенство (1) не всегда выполнимо, что ограничивает применимость подобного способа коммутации. Поэтому был предложен способ формирования многоканального электрического пробоя [5], не требующий столь высоких скоростей роста межэлектродного напряжения. Для реализации его в твердотельный изолятор, выполненный в виде комбинации диэлектрических пленок, закладывается металлическая фольга, находящаяся под плавающим потенциалом, и обеспечиваются условия первичного одноканального самопробоя между фольгой и одним из электродов с последующим вторичным пробоем между фольгой и другим электродом. Вторичный пробой вызывает изменение потенциала фольги после первичного пробоя и будет иметь уже многоканальную структуру, если это изменение происходит достаточно быстро для выполнения условия, аналогичного неравенству (1). В ме-

<sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>2</sup> Саровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Нижегородская обл., Россия

\*E-mail: karpov@elph.vniief.ru

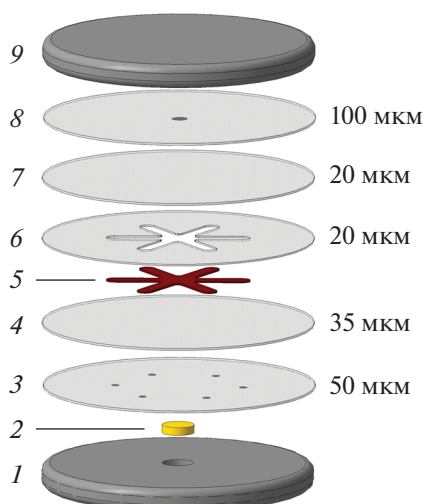


Рис. 1. Схема компоновки элементов шестиканального разрядника на  $(38 \pm 3)$  кВ.

стах вторичного пробоя генерируются кумулятивные плазменные струи, которые могут приводить к образованию между электродами сквозных токовых каналов.

Конкретизировать исходные условия и последовательность процессов можно на примере шестиканального разрядника с пробивным напряжением  $(38 \pm 3)$  кВ, разработанного для коммутации импульсного тока с амплитудой свыше одного мегаампера. Компоновка элементов разрядника схематично представлена на рис. 1. В качестве изолятора используются лавсановые пленки 3, 4 и 6–8, зажатые между высоковольтным электродом 1 и заземленным электродом 9. В центральном вырезе пленки 6 размещается фольговая пластина 5, находящаяся под плавающим потенциалом. Форма ее может быть разной; в данном случае она выполнена в виде лепесткового шестиконечника диаметром 90 мм, вырезанного из медной фольги толщиной 20 мкм. Electroды имеют гладкие рабочие поверхности, а возмущающее электрическое поле неоднородности создается с использованием контактирующих с электродом сегментов сферических оболочек из алюминиевой фольги толщиной 10 мкм, вплавленных в прилегающие к электродам лавсановые пленки. Электрический контакт между вплавленным фольговым сегментом и электродом осуществляется с помощью гранулы пористого алюминия, располагаемой в полости между вплавленной фольгой и плоскостью электрода. В пленке 8, прилегающей к заземленному электроду, по центру создана одна неоднородность; в пленке 3, прилегающей к высоковольтному электроду, созданы 6 периферийных неоднородностей, располагаемых равномерно по азимуту на диаметре 80 мм. В центральной части высоковольтного электрода 1 имеется вы-

емка для диэлектрической вставки 2, предотвращающей отвлечение на электрод тока первичного пробоя. Толщина зажатой между электродами пленочной сборки составляет 225 мкм.

В исходном состоянии, перед первичным пробоем, потенциал  $U_9$  заземленного электрода равен нулю, потенциал  $U_1$  высоковольтного электрода, близкий к пробойному, примем равным 38 кВ. Исходное значение  $U_5$  плавающего потенциала фольговой пластины 5 определяется соотношением суммарных толщин лавсановых пленок 3 + 4 и 7 + 8, отделяющих ее от электродов. В данном случае  $U_5$  составляет около 22 кВ. Соответственно, исходная разность потенциалов  $U_{15}$  между высоковольтным электродом 1 и фольговой пластиной равна примерно 16 кВ. Благодаря первичному пробоему потенциал фольговой пластины резко падает. В отсутствие последующего пробоя он приблизился бы к нулю за время  $\tau$ , слагаемое из времени разгорания токового канала первичного пробоя и времени порядка одного или нескольких радиальных пробегов электромагнитной волны вдоль пластины. При  $\tau$  порядка наносекунды скорость роста напряжения между пластиной и высоковольтным электродом

$$\frac{dU_{15}}{dt} \approx \frac{\Delta U_{15}}{\tau},$$

вызванного первичным пробоем, оценивается в  $2 \times 10^{13}$  В/с, что существенно превышает пороговую величину  $10^{12}$  В/с, входящую в правую часть неравенства (1). В этом случае можно предполагать многоканальную структуру вторичного пробоя, инициируемого за счет резкого увеличения разности потенциалов между фольговой пластиной и высоковольтным электродом. Справедливость этого предположения подтверждена экспериментально при проверке технического решения [5].

В настоящей работе показана возможность создания на этом принципе многоканального сверхноточного разрядника с наносекундным срабатыванием.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Методы подготовки многослойных пленочных изоляторов отработывались на макетных сборках разрядников, которые испытывались на специальном стенде при напряжении до 50 кВ, нарастающем перед пробоем со скоростью  $10^9$ – $10^{10}$  В/с, и амплитуде разрядного тока до 100 кА. На стенде также проведены эксперименты по развитию предложенного ранее способа [5] поэтапного формирования пробоя многослойного пленочного изолятора. В трех вариантах макетныхборок получены пробоеи по трем, шести и двенадцати каналам. В дальнейшем исследова-

ния ограничили шестиканальными макетными сборками разрядников. В первых экспериментах использовалась круглая пластина из медной фольги толщиной 20 мкм диаметром 90 мм, которая затем была заменена на аналогичную пластину в форме лепесткового шестиконечника. Пластина вкладывалась в центральный вырез лавсановой пленки, как показано на рис. 1. Использование лепестковой формы фольги обеспечило воспроизводимость результатов, позволяющую провести систематические исследования. В результате показано, что при компактном последовательном соединении двух одинаковых макетныхборок путем наложения друг на друга суммарное пробивное напряжение удваивается с сохранением количества каналов вторичного пробоя в каждой сборке. Определены условия, при которых в макетной сборке разрядника, в местах вторичного пробоя, стабильно образуются сквозные токовые каналы между электродами. Наличие таких каналов косвенно подтверждает возможность автоматического обеспечения сильноточного многоканального пробоя при невысоких, значительно меньших  $10^{12}$  В/с, исходных скоростях нарастания межэлектродного напряжения. Это способствовало началу сильноточных экспериментов по определению свойств разрядников подобного типа.

Одним из основных коммутационных параметров разрядника является время срабатывания  $\tau_p$ , в течение которого разность потенциалов  $U_p(t)$  между его электродами существенно снижается относительно начальной величины  $U_0$ . При квазистационарном изменении электрических величин зависимость  $U_p(t)$  от времени можно определять по производной разрядного тока, коммутируемого на индуктивную нагрузку:

$$U_p(t) = U_0 - L_0 \cdot \frac{dI}{dt}.$$

В этом случае время  $\tau_p$  совпадает с измеряемой длительностью  $\Delta t$  фронта импульса производной тока. При определении  $\tau_p$  в условиях нарушения квазистационарности необходимо учитывать волновые проявления токовых процессов. Исходя из этого, используемую нагрузку будем рассматривать как отрезок коаксиальной передающей линии с волновым сопротивлением  $\rho$ , временем пробега электромагнитной волны  $\tau_{пр}$ . Считаем, что к одному концу линии подведено высокое напряжение  $U_0$ , а второй конец закорочен. Исследуемый разрядник располагается в средней части отрезка линии в разрыве внутреннего токопровода коаксиала. В предельном случае мгновенной коммутации ( $\tau_p = 0$ ) по обе стороны от разрядника возбуждаются распространяющиеся электромагнитные импульсы с бесконечно крутыми фронтами.

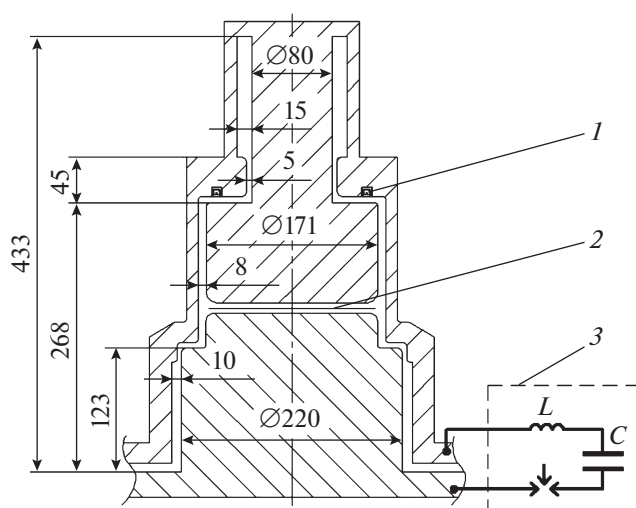


Рис. 2. Геометрия коаксиальной линии и схема включения в разрядный контур (1 – индукционные датчики, 2 – место расположения разрядника, 3 – конденсаторная батарея).

В этом случае установившаяся скорость нарастания тока

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_m = \frac{U_0}{\rho} \cdot \tau_{пр}$$

достигается за время  $\Delta t$  порядка  $\tau_{пр}$ . Конечная скорость срабатывания разрядника ( $\tau_p \neq 0$ ) приводит к затягиванию фронта импульса производной тока  $\Delta t \approx \tau_{пр} + \tau_p$  и снижению установившейся скорости роста тока

$$\left(\frac{dI}{dt}\right)_m = \frac{U_0}{\rho} \cdot (\tau_p + \tau_{пр}), \quad (2)$$

что можно использовать для дополнительного уточнения  $\tau_p$  по измеряемой величине  $\left(\frac{dI}{dt}\right)_m$ . Исходя из геометрии коаксиальной линии, рис. 2, время пробега электромагнитной волны и усредненное значение волнового сопротивления оцениваются как  $\tau_{пр} = 2.5$  нс и  $\rho = 6.4$  Ом.

К коммутационным параметрам можно также отнести количество формируемых токовых каналов, пробивное напряжение, индуктивность, габариты, стабильность работы, коммутируемый ток, выделяемая в разряднике энергия и т.д. Некоторые из них могут корректироваться в зависимости от конкретных применений разрядника. В настоящей работе оценено время его срабатывания  $\tau_p$  по измеряемому импульсу производной тока. Эксперименты проводились на установке КАСКАД [6] с использованием трех секций конденсаторной батареи общей емкостью 123 мкФ, заряжаемой до 38 кВ и обеспечивающей нарастание разрядного тока до полутора мегаампер за время около 3 мкс. Разрядник встраивался в раз-

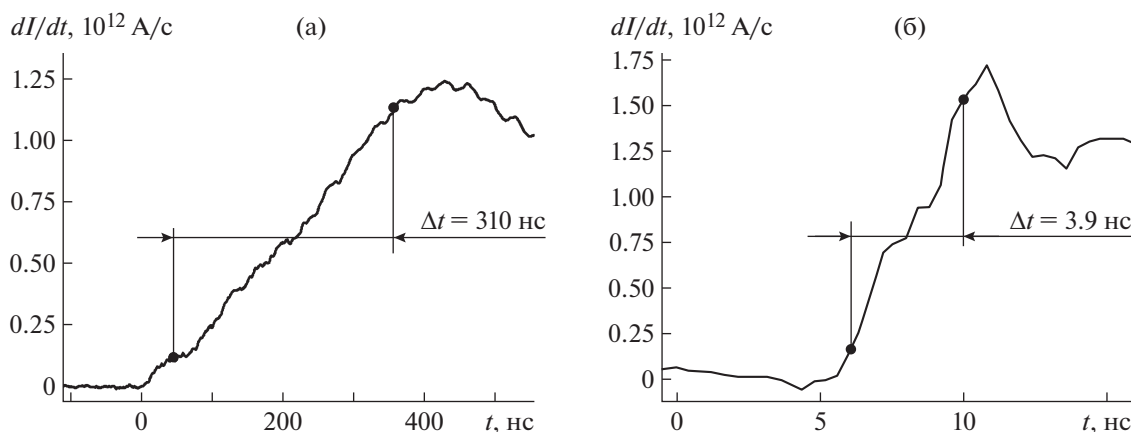


Рис. 3. Осциллограммы фронтальной части импульсов производной тока в тестовом эксперименте (а) и в эксперименте с разрядником (б).

рыв внутреннего токопровода закороченного отрезка коаксиальной линии, входной конец которой соединен с токовым коллектором конденсаторной батареи. Помимо экспериментов с разрядником, проведены тестовые эксперименты с такой же коаксиальной линией, но без разрыва внутреннего токопровода. Геометрия коаксиальной передающей линии и схема включения ее в разрядный контур показаны на рис. 2.

На начальном этапе подготовки эксперимента выполняется клеевое соединение многослойного пленочного изолятора с высоковольтным электродом и с плотно охватывающим электрод цилиндрическим полиэтиленовым изолятором. Заземляемый электрод, составляющий вторую часть разрядника, независимым образом крепится к внутреннему токопроводу коаксиала с обеспечением сильноточного контакта. После завершения полимеризации клея высоковольтная часть разрядника вставляется в разрыв коаксиальной линии и плотно прижимается к закрепленному заземленному электроду. Контролируемое осевое усилие прижатия составляет более тонны. На завершающем этапе сборки обеспечивается сильноточный контакт высоковольтной части разрядника с внутренним токопроводом коаксиальной линии.

На рис. 3 приведены осциллограммы фронтальных участков импульсов производной тока, полученные в тестовом эксперименте и в эксперименте с исследуемым разрядником. Видно, что разрядник сильно влияет на фронт импульса производной тока. Длительность фронта  $\Delta t$ , определяемая как время нарастания сигнала от 0.1 до 0.9 амплитудного значения, в тестовом эксперименте составляет около 300 нс. Использование разрядника дает сокращение  $\Delta t$  примерно до 4 нс. Учитывая, что часть длительности фронта  $\Delta t$  определяется временем пробега электромагнит-

ной волны,  $\tau_{пр} = 2.5$  нс, получаем время срабатывания разрядника  $\tau_p \approx 1.5$  нс. Найденное значение  $\tau_p$  свидетельствует о существенной роли волнового механизма переноса тока и оправдывает использование формулы (2) для дополнительной оценки времени срабатывания разрядника. Подставляя в (2)  $U_0 = 38 \times 10^3$  В,  $\tau_{пр} = 2.5 \times 10^{-9}$  с,  $\rho = 6.4$  Ом, измеренную в эксперименте максимальную производную тока  $\left(\frac{dI}{dt}\right)_m = 1.7 \times 10^{12}$  А/с, получаем  $\tau_p \approx 10^{-9}$  с, что по порядку величины совпадает с оценкой  $\tau_p$  по длительности фронта импульса производной тока. Как видно по фотографиям рис. 4, в разряднике образуются шесть примерно одинаковых токовых каналов. Радиусы их составляют около 10 мм, центры каналов расположены в местах электродных неоднородностей на диаметре 80 мм. Состояние электродной сборки после разряда свидетельствует о том, что испаренный металл электродов и продукты горения лавсана остаются в местах протекания тока. Следует отметить, что в некоторых разрядах, по разным причинам, получались не шесть, а четыре-пять токовых каналов, однако это не отразилось заметным образом на измеренной длительности фронта импульса производной тока.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основные результаты работы получены благодаря освоенным методам изготовления многослойного пленочного изолятора с вложенной фольгой, располагаемого между плоскопараллельными электродами разрядника. Значительных усилий потребовала отработка способа создания в изоляторе электродных неоднородностей, обеспечивающих локальные возмущения электрического поля. Проблема решена с использованием сегментов сферических оболочек из тонкой алюми-

ниевой фольги, вплавляемых в прилегающие к электродам лавсановые пленки. Электрический контакт между вплавленным фольговым сегментом и электродом осуществляется с помощью гранулы пористого алюминия, располагаемой в полости между вплавленной фольгой и плоскостью электрода. Используемые методы изготовления изолятора обеспечили приемлемую для систематических исследований воспроизводимость результатов электрического пробоя. При этом оказалось возможным сжатие пленочной сборки с усилием более тонны без изменения ее пробивных свойств.

Макетные пленочные сборки разрядников испытывались на специальном стенде при напряжении до 50 кВ, нарастающем перед пробоем со скоростью  $10^9$ – $10^{10}$  В/с. В качестве рабочего варианта выбрана разновидность сборки с шестью периферийными электродными неоднородностями. Испытаны круглая и лепестковая шестиконечная форма медной фольги, закладываемой между лавсановыми пленками. Лепестковая форма дает более высокую повторяемость многоканальных пробоев, что можно объяснить увеличением гальванической развязки между токовыми каналами. На двойных, последовательно соединенных, макетных сборках подтверждена возможность каскадного соединения коммутационных элементов с пропорциональным увеличением результирующего пробивного напряжения. В экспериментах с единичными макетными сборками подобраны оптимальные условия для возникновения сквозных токовых каналов между электродами в местах вторичного пробоя. Это позволило выбрать исходный вариант конструкции сильноточного разрядника и приступить к его экспериментальным исследованиям.

Сильноточные эксперименты с разрядником проводились на конденсаторной установке емкостью 123 мкФ, заряжаемой до 38 кВ. Амплитуда разрядного тока составила около полутора мегаампер. В результате экспериментов определены условия стабильного формирования шести токовых каналов. Показано, что время срабатывания разрядника по порядку величины не превышает наносекунды и не зависит от числа  $N$  формируемых токовых каналов, если  $N \geq 4$ . При шестиканальном пробое амплитуда формируемого импульса производной тока максимальна и равна  $(1.7\text{--}1.8) \times 10^{12}$  А/с. Сжатие пленочной сборки с усилием более тонны позволяет полностью локализовать продукты разряда в местах протекания тока. Благодаря этому можно предельно сократить количество деталей, подлежащих замене после каждого импульса, при работе разрядника в составе стационарной установки.

Разработанный разрядник может быть использован для обострения фронта импульса произ-

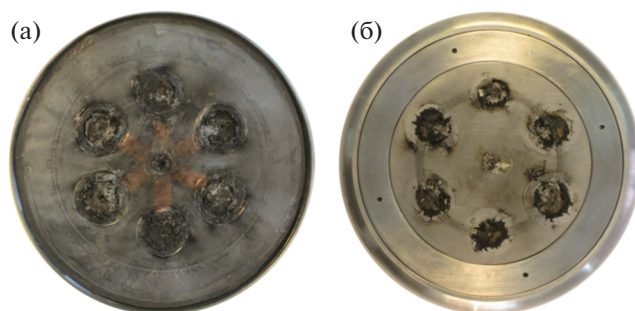


Рис. 4. Фотографии высоковольтной части разрядника (а) и заземляемого электрода (б) после эксперимента.

водной тока в электроразрядном источнике нейтронов типа плазменного фокуса [7]. Обострение фронта, достигаемое с помощью такого разрядника, должно приводить, согласно [8], к увеличению интенсивности генерируемого нейтронного излучения. Это особенно актуально для форсированных режимов работы нейтронных источников при использовании взрывомагнитных генераторов энергии [3, 6].

Направление последующей разработки подобных разрядников может быть ориентировано на электрофизические термоядерные системы [2], для которых необходима наносекундная коммутация токов на уровне 100 МА при напряжениях до 10 МВ. Существенным шагом по данному направлению могло бы быть создание каскадных коммутационных систем с пробивными напряжениями в сотни киловольт. При этом представляется реальной перспектива дальнейшего совершенствования способов гальванической развязки между токовыми каналами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Освоены методы изготовления и испытания неуправляемых твердотельных разрядников с многослойным пленочным изолятором. Испытания проводились на специальном высоковольтном стенде и на сильноточной конденсаторной установке.

Создан неуправляемый многоканальный разрядник нового типа, основанный на поэтапном пробое плоского пленочного изолятора с вложенной между пленками изолированной фольговой пластиной. Показано, что время срабатывания такого разрядника не превышает одной наносекунды.

Разрядник может применяться для обострения фронта импульса напряжения в существующих устройствах с мегаамперными токами. Принцип формирования многоканального сильноточного пробоя может использоваться при разработке на-

носекундных коммутаторов мультимегаамперных токов по направлениям термоядерных исследований с применением взрывомагнитных генераторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Garanin S.G., Ivanovsky A.V., Mkhitariyan L.S.* An ICF system based on Z-pinch radiation produced by an explosive magnetic generator // *Nucl. Fusion*. 2011. V. 51. 103010 (15 p).
2. *Гаранин С.Г., Ивановский А.В., Куликов С.М., Мамышев В.И., Певный С.Н., Рогачев В.Г.* Инерционный термоядерный синтез с применением взрывомагнитных генераторов // *Физика плазмы*. 2022. Т. 48. № 2. С. 131–140.
3. *Гриневиц Б.Е., Демидов В.А., Ивановский А.В., Селемир В.Д.* Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах // *УФН*. 2011. Т. 181. № 4. С. 422–427.
4. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004. 704 с.
5. *Карпов Г.В.* Способ формирования многоканального электрического пробоя твердотельного изолятора и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2733050 от 04.03.2020.
6. *Аблесимов В.Е., Андрианов А.В., Базанов А.А. и др.* Разработка плазмофокусного нейтронного источника, запитываемого от взрывомагнитного генератора // *ПМТФ*. 2015. Т. 56. № 1. С. 94–103.
7. *Mather J.W., Bottoms P.J.* Characteristics of the Dense Plasma Focus Discharge // *Phys. Fluids*. 1968. V. 11. № 3. P. 611–618.
8. *Ивановский А.В., Калинычев А.Е., Карпов Г.В.* Метод улучшения начальной азимутальной однородности токовой оболочки в устройствах с плазменным фокусом // *Физика плазмы*. 2021. Т. 47. № 2. С. 109–116.

## A NEW TYPE OF UNCONTROLLED MULTICHANNEL DISCHARGER FOR NANOSECOND SWITCHING OF MEGAAMPERE CURRENTS

**E. A. Galanova<sup>a</sup>, Yu. N. Dolin<sup>a</sup>, A. V. Ivanovskiy<sup>a,b</sup>, A. E. Kalinychev<sup>a,b</sup>,  
G. V. Karpov<sup>a,b</sup>, S. S. Lomtev<sup>a,b</sup>, A. G. Merzlov<sup>a</sup>, V. N. Nudikov<sup>a</sup>, D. S. Prokhorov<sup>a</sup>,  
E. A. Salatov<sup>a,b</sup>, A. N. Turov<sup>a</sup>, and A. A. Shatalin<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Russian Federal Nuclear Center – All-Russia Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhniy Novgorod Region, Russia*

<sup>b</sup> *Sarov Physicotechnical Institute NRNU MEPhI, Sarov, Nizhniy Novgorod Region, Russia*

Presented by the Academician of the RAS S.G. Garanin

An uncontrolled multichannel discharger based on the phased breakdown of a multilayer film insulator with an embedded foil plate under a floating potential has been developed. A sharp change in the foil potential after a single-channel initial self-breakdown between the foil and one of the electrodes leads to a multi-channel secondary breakdown between the foil and the other electrode. Cumulative plasma jets are generated in places of breakdown and they initiate the formation of the through current channels between the electrodes at the third stage of the breakdown. The developed multichannel discharger has a nanosecond response time and can be used to sharpen the voltage pulse front in the electric-discharge devices with megaampere currents. A similar method of forming a multichannel breakdown can be used in the development of the nanosecond switches of multimegaampere currents in the areas of thermonuclear research using the explosive magnetic energy generators.

*Keywords:* film insulator, electric breakdown, nanosecond operation, current channels