

04;12

## Исследование стабильности срабатывания частотного разрядника при напряжении до 300 kV и коммутируемой энергии до 450 J

© Б.М. Ковальчук, Ю.Д. Королев, Е.В. Кумпяк

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: korolev@lnp.hcei.tsc.ru

(Поступило в Редакцию 15 сентября 2011 г.)

Дано описание конструкции и приведены результаты исследований двухэлектродного искрового разрядника для включения емкостного накопителя энергии при следующих режимах: рабочее напряжение — до 300 kV, коммутируемая энергия — до 450 J, ток разрядника — до 20 kA, частота следования импульсов — до 10 Hz. За счет специфического режима самопробоя, в котором току искры предшествует предпробойная стадия коронного разряда, достигнута стабильность срабатывания разрядника по напряжению на уровне 10%.

### Введение

Для формирования сильноточных высоковольтных импульсов в самых различных устройствах традиционно используются генераторы с первичным емкостным накопителем энергии и газовыми разрядниками [1,2]. При напряжениях (от 100 kV и более), как правило, применяется импульсная зарядка емкостного накопителя. Чтобы обеспечить срабатывание разрядника в заданный момент времени, т.е. при заданном напряжении, целесообразно применять управляемые разрядники. Однако устройства с внешним запуском достаточно сложны, особенно при высоких напряжениях. Поэтому особый интерес представляют двухэлектродные разрядники, работающие в режиме самопробоя. Напряжение, при котором происходит пробой разрядника, может изменяться от импульса к импульсу. Соответственно одной из проблем является обеспечение стабильного срабатывания разрядника по напряжению.

Электрическая прочность газоразрядного промежутка часто характеризуется так называемым напряжением статического пробоя  $V_{st}$ . Когда мы говорим о статическом пробое и измерении  $V_{st}$ , то подразумеваем следующую ситуацию. К электродам прикладывается напряжение, медленно растущее во времени. Первичные электронные лавины развиваются из одиночных иницирующих электронов, возникающих на поверхности катода. Характерное время подъема напряжения должно быть существенно больше, чем время между появлением иницирующих электронов и чем время развития предпробойных явлений до начала резкого роста тока. В таких условиях практически отсутствует разброс пробивного напряжения. Здесь для умеренных производений давления газа на длину зазора  $pd$  результаты измерений  $V_{st}$  обычно совпадают с расчетами на основе таунсендовского критерия развития самостоятельного разряда [3,4]. Для высоких  $pd$  (около 1000 V/cm · Torr и более) статическое пробивное напряжение можно оценить из критерия стримерного пробоя.

Однако в реальных разрядниках при подаче на электроды импульсного напряжения условия часто отли-

чаются от описанной идеализированной картины. Импульсный пробой может происходить как при напряжениях выше напряжения статического пробоя, так и при напряжениях меньше, чем  $V_{st}$ , определенное описанным выше способом. В сильноточных разрядниках катод подвергается значительной эрозии, и ток эмиссии иницирующих электронов сильно зависит от состояния поверхности катода [4–7]. Тогда, если на катоде возникают микроучастки с повышенной электронной эмиссией, то за счет тока эмиссии импульсное пробивное напряжение может оказаться ниже, чем  $V_{st}$ .

Особый случай — это разрядники, работающие в режиме высокой частоты следования импульсов. Здесь снижение напряжения импульсного пробоя и большой разброс пробивных напряжений происходит за счет того, что предшествующий разряд влияет на условия пробоя в последующем разряде. Например, в промежутке могут оставаться газодинамические возмущения, либо следы не распавшейся полностью плазмы.

При создании разрядников применяются специальные меры, чтобы предотвращать нестабильность пробивного напряжения. Ясно, что здесь используют прокачку газа, причем выбор межэлектродной конфигурации и подбор скорости прокачки представляют собой специальную и не простую проблему [2,8–10]. Кроме того, применяют системы со специально создаваемым коронным разрядом, чтобы стабилизировать ток иницирующих электронов с катода [11,12].

К настоящему времени получены впечатляющие результаты по исследованию и созданию двухэлектродных разрядников, работающих в режиме самопробоя. Например, при уровне энергии порядка 10 J и менее созданы разрядники с частотой следования импульсов до нескольких сотен. Для получения наносекундных импульсов используются режимы разрядников высокого давления, близкие к статическому пробое [2,8–10,13], а в субнаносекундных генераторах используется режим пробоя сильно перенапряженных промежутков [14–16].

Тем не менее, для разрядников с большой коммутируемой энергией описанные выше проблемы стабильности срабатывания по напряжению не решены. Настоящая

работа направлена на исследование разрядников применительно к устройствам с энергией на уровне сотен джоулей, при зарядном напряжении до 300 кВ и частоте следования импульсов около 10 Hz. Предложена оригинальная конструкция разрядника. Обсуждаются физические механизмы, обуславливающие нестабильную работу разрядника в режиме самопробоя, и рассмотрены технические решения, позволяющие улучшить стабильность.

## Экспериментальная установка и конструкция разрядника

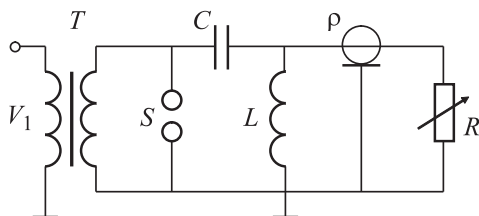
Упрощенная схема, демонстрирующая принцип работы установки в целом, представлена на рис. 1.

Зарядка накопительной емкости  $C$  до напряжений 250–300 кВ осуществляется от электрической схемы на основе высоковольтного импульсного трансформатора  $T$ . На первичной обмотке трансформатора формируется импульс напряжения  $V_1$  амплитудой 1.5–1.8 кВ с током около 10 кА. Коэффициент трансформации  $K = 170$ , а время зарядки емкости до максимального напряжения равно  $85 \mu\text{s}$ .

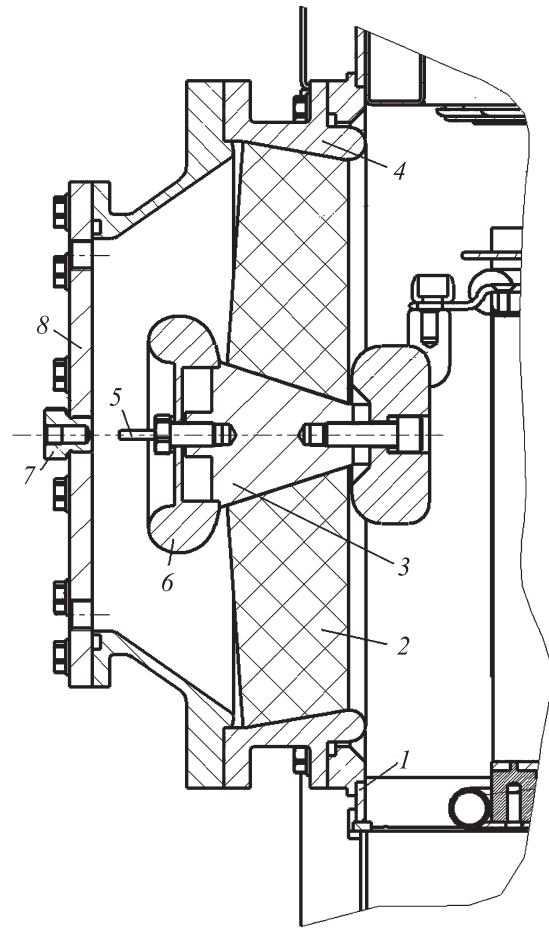
В целом система предназначена для дробления твердых материалов при электрическом пробое [17]. Соответственно, нагрузкой  $R$  является камера дробления, на электроды которой подается высоковольтный импульс. Кроме того, при испытаниях использовалась эквивалентная нагрузка. В этом случае она представляла собой водяное сопротивление  $R = 40 \Omega$ . В обычных режимах частота следования импульсов напряжения и тока на нагрузке была 10 Hz.

Конструкция высоковольтного разрядника  $S$  представлена на рис. 2.

Разрядник монтируется на стенке бака  $I$ , заполненного трансформаторным маслом. Внутри бака размещены накопительная емкость  $C$ , импульсный трансформатор  $T$  и делитель напряжения для зарядного импульса. Проходной изолятор разрядника  $2$  вместе с держателем катода разрядника  $3$  и фланцем  $4$  разделяет объем высоковольтного блока зарядки, заполненного трансформаторным маслом, от газового объема разрядника. Катод



**Рис. 1.** Упрощенная электрическая схема установки:  $T$  — импульсный трансформатор для зарядки первичного емкостного накопителя  $C = 0.011 \mu\text{F}$ ,  $L$  — зарядная индуктивность,  $S$  — искровой разрядник высокого давления,  $p = 47 \Omega$  — высоковольтная коаксиальная линия для передачи импульса напряжения на нагрузку  $R$ .



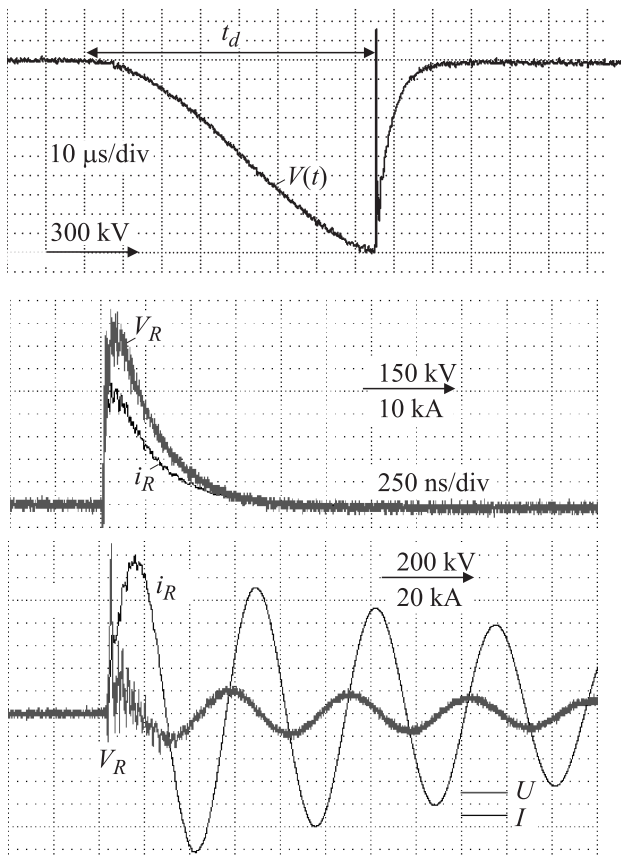
**Рис. 2.** Схематический чертеж разрядника  $S$ .  $1$  — стенка бака, заполненного трансформаторным маслом,  $2$  — проходной изолятор разрядника,  $3$  — держатель катода,  $4$  — фланец,  $5$  — катод,  $6$  — экранирующий электрод,  $7$  — анод,  $8$  — заземленный анодный фланец.

разрядника  $5$  и экранирующий электрод  $6$  монтируются на держателе катода. Анод  $7$  расположен на заземленном фланце  $8$ .

Для удаления продуктов эрозии из межэлектродного зазора используется непрерывная прокачка газа через разрядник. Газ (сухой воздух) подается через отверстие диаметром 2 мм на оси анода  $7$ . Выход газа осуществляется через соответствующее отверстие во фланце  $8$ . Полный объем воздуха в разряднике составляет около 6 л, а рабочее давление может достигать 7 atm.

## Результаты экспериментов

В экспериментах регистрировались напряжение на накопительном конденсаторе, а также напряжение на нагрузке и ток в нагрузке. Пример осциллограмм для условий, когда напряжение на первичной обмотке импульсного трансформатора  $V_1 = 1.8 \text{ kV}$  и давление воздуха в разряднике  $p = 6.2 \text{ atm}$  представлен на рис. 3.



**Рис. 3.** Напряжение на емкостном накопителе  $V(t)$ . Напряжение на нагрузке  $V_R$  и ток в нагрузке  $i_R$  для двух случаев: нагрузкой является водяное сопротивление, нагрузкой является межэлектродный зазор камеры для дробления твердых материалов.

Видно, что в процессе зарядки накопительного конденсатора напряжение  $V(t)$  на нем возрастает. Затем, спустя время запаздывания пробоя  $t_d = 75 \mu\text{s}$  происходит срабатывание разрядника и на нагрузке формируются импульс напряжения  $V_R(t)$  и импульс тока  $i_R(t)$ .

Как отмечалось ранее, в качестве нагрузки служило либо водяное сопротивление ( $R \approx 40 \Omega$ ), либо межэлектродный промежуток в камере для дробления твердых материалов. В первом случае волновое сопротивление электрической цепи было меньше  $R$ . Тогда импульсы напряжения и тока имеют аperiodическую форму. Во втором случае имеет место электрический пробой в камере для дробления. Здесь сопротивление искрового канала при пробое мало, и ток имеет колебательный характер.

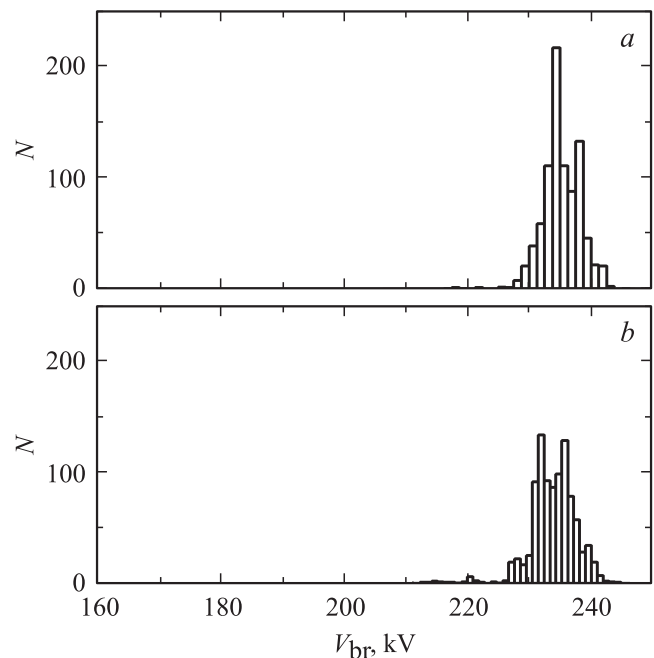
Одной из основных проблем, которая решалась в настоящей работе, было достижение стабильного времени запаздывания пробоя  $t_d$  и соответственно стабильного напряжения импульсного пробоя разрядника  $V_{br}$ . В экспериментах авторы испытывали три типа конфигурации межэлектродного промежутка. Вначале использовался электрод 5 с большим радиусом кривизны, когда поле в промежутке близко к однородному. Далее испытывались

различные электроды в форме стержня, торец которого представлял полусферу. Наконец, использовался стержень с плоским торцом и радиусом кромки около  $0.5 \text{ mm}$ . Отметим заранее, что наилучшие результаты по стабильности срабатывания получены для последнего случая.

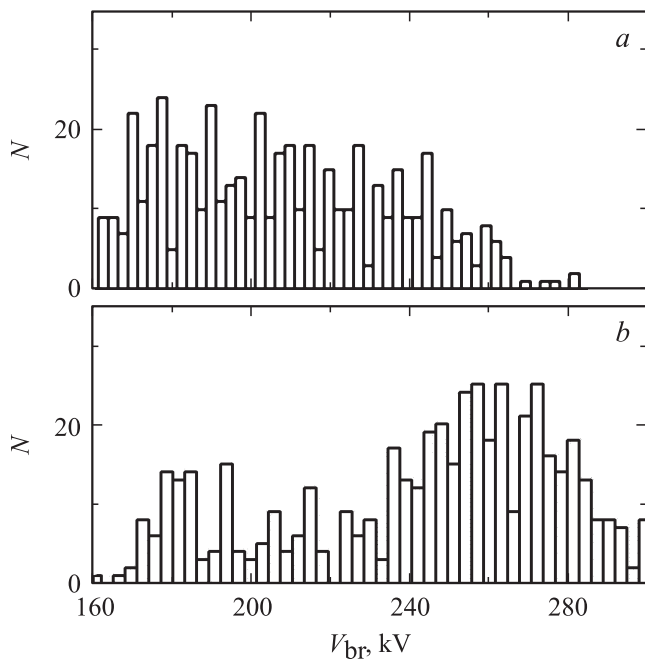
На рис. 4 представлены гистограммы, демонстрирующие распределение импульсных пробивных напряжений  $V_{br}$  в разряднике при частоте следования импульсов  $10 \text{ Hz}$ , когда катод имел форму стержня с плоским торцом ( $N$  — количество импульсов в заданном интервале  $\Delta V_{br}$  пробивных напряжений). Общее количество импульсов для построения гистограммы составляло 1000. Именно этот режим был типичным для работы установки для дробления твердых материалов [17].

Обращает на себя внимание то, что разброс срабатывания разрядника по напряжению зависит от вида нагрузки. В частности, когда нагрузкой является камера дробления, то количество импульсов с пониженным пробивным напряжением возрастает. В общем случае это нетрудно понять из соображения, что процесс возникновения инициирующих электронов на катоде в каждом конкретном импульсе может зависеть от характера тока разряда, протекающего в предшествующем импульсе.

Рисунок 5 иллюстрирует случай использования катода в виде стержня с полусферическим торцом. Здесь разброс пробивных напряжений разрядника сильно воз-



**Рис. 4.** Гистограммы распределения пробивных напряжений для промежутка с катодом в форме цилиндрического стержня с плоским торцом. Диаметр стержня  $D = 0.6 \text{ cm}$ , межэлектродное расстояние  $d = 1.5 \text{ cm}$ , давление газа  $p = 5.8 \text{ atm}$ , напряжение на первичной обмотке импульсного трансформатора  $V_1 = 1.5 \text{ kV}$  (максимальное зарядное напряжение  $V_m = 255 \text{ kV}$ ).  $a$  — нагрузкой является водяное сопротивление,  $b$  — нагрузкой является камера для дробления твердых материалов.



**Рис. 5.** Гистограммы распределения пробивных напряжений для промежутка с катодом в форме цилиндрического стержня со сферой на торце. Диаметр стержня  $D = 0.6$  см, давление газа  $p = 6.2$  atm, напряжение на первичной обмотке импульсного трансформатора  $V_1 = 1.8$  кВ (максимальное зарядное напряжение  $V_m = 306$  кВ), нагрузкой является камера для дробления твердых материалов. *a* — межэлектродное расстояние  $d = 1.8$  см, *b* —  $d = 2.1$  см.

растает. От импульса к импульсу пробоя наблюдаются в диапазоне напряжений от 160 до 306 кВ. Такая же ситуация характерна для условий, когда катодом служит электрод с большим радиусом кривизны, и поле вдоль оси разряда близко к однородному.

## Обсуждение результатов

Рассмотрим вначале процесс развития пробоя на качественном уровне в условиях, когда используется катод с большим радиусом кривизны, либо катод в виде стержня диаметром 0.6 см со сферическим торцом. В геометрии электродов сфера–плоскость канал искрового разряда возникает вблизи оси системы. В условиях эксперимента запасаемая в накопителе энергия довольно высока. Поэтому после протекания тока искрового разряда на катоде могут образовываться участки с повышенной электронной эмиссией (кромки микрократеров, пленки окислов, участки с пониженной работой выхода). Тогда канал разряда возникает на катоде не случайным образом, а заведомо привязывается к таким участкам.

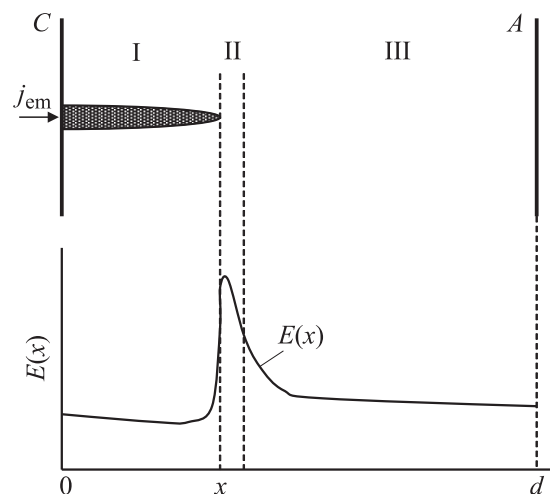
Процесс развития пробоя в описанных условиях схематично иллюстрируется на рис. 6. Даже если среднее электрическое поле в зазоре заведомо мало для образования критической лавины и возникновения стримера или для выполнения таунсендовского критерия пробоя,

то вследствие повышенной электронной эмиссии количество электронов и ионов в развивающихся с катода лавинах достаточно для образования слабопроводящего плазменного канала [4,18]. Поле на кончике канала (в области II) усиливается, и в этой области происходит интенсивная ударная ионизация. В результате канал распространяется в промежуток (в область III) в виде волны ионизации [19,20].

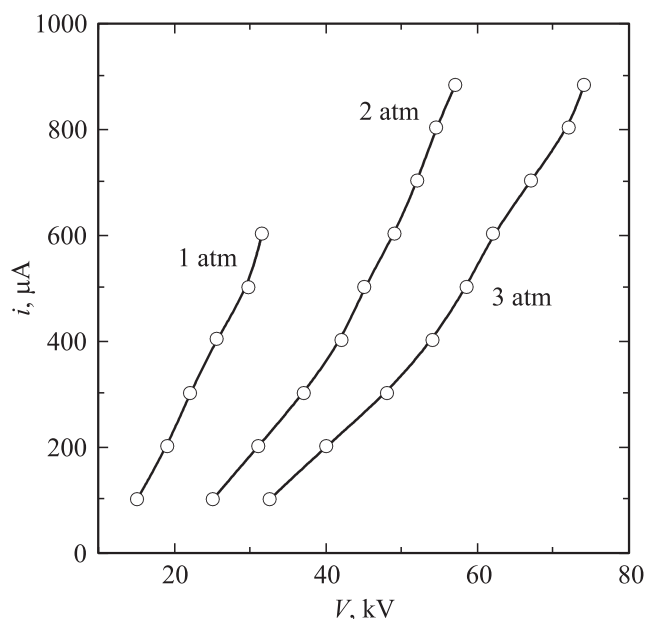
Таким образом, определяющим фактором является именно то, что на катоде имеется некоторый локальный микроучасток с повышенной эмиссией, с которого в предпробойной стадии и развивается плазменная область I. Тогда при больших токах эмиссии импульсное пробивное напряжение снижается довольно сильно. Например, на рис. 5, *a* видно, что максимальные пробивные напряжения, достигаемые на некоторых импульсах составляют 282 кВ. Если оценить статическое пробивное напряжение из критерия стримерного пробоя, то получим именно такую величину пробивного напряжения. Тем не менее, разброс пробивных напряжений определяется разбросами тока эмиссии и составляет от 282 до 160 кВ.

При использовании катода в виде стержня с плоским торцом электрическое поле усилено на кромке катода, поэтому уже при низких напряжениях должны возникать эмиссионные центры и должен появляться коронный разряд. Это предположение было проверено в эксперименте. На рис. 7 показана вольт-амперная характеристика (ВАХ) коронного разряда при подаче на электроды постоянного напряжения. Кривые сняты до напряжений, при которых происходит переход коронного разряда в искровую. Ток коронного разряда протекает равномерно по всей кромке острия, причем в стационарном режиме он достигает значений в несколько сотен микроампер (вплоть до миллиампера).

Наличие такого коронного разряда в предпробойной стадии меняет ситуацию в промежутке существенным



**Рис. 6.** Качественная иллюстрация развития пробоя для условий, когда на катодной поверхности имеется область с повышенной электронной эмиссией.



**Рис. 7.** Ток коронального разряда в промежутке  $d = 1.55$  см для катода в форме стержня с плоским торцом.

образом. С одной стороны, прикатодная плазма коронального разряда, по сути, может рассматриваться как источник инициирующих электронов в основной зазор. Однако плазма экранирует острую катодную кромку, и электрическое поле по длине промежутка выравнивается [21,22]. В таких условиях отсутствует локальный участок с повышенной эмиссией, с которого и происходит развитие канала при низких напряжениях, как было рассмотрено ранее. Здесь же вся поверхность плазмы дает равномерный поток электронов в зазор, и поле на границе плазмы практически не усиливается. Тогда переход коронального разряда в искру возникает при более высоких напряжениях на промежутке (рис. 4).  
**Заключение**

В настоящей работе представлено описание конструкции двухэлектродного искрового разрядника высокого давления для включения емкостного накопителя энергии на различные типы нагрузок при следующих режимах: рабочее напряжение — до 300 кВ, коммутируемая энергия — до 450 Дж, ток разрядника — до 20 кА, частота следования импульсов — до 10 Гц. Такой разрядник был, в частности, использован в установке для дробления твердых материалов при электрическом пробое.

Предложены режимы работы, позволяющие в условиях самопробоя достичь стабильности срабатывания по напряжению на уровне 10%. Такая высокая стабильность получается в условиях, когда току искры предшествует предпробойная стадия коронального разряда. При наличии коронального разряда происходит выравнивание электрического поля по длине промежутка и стабилизируется поток инициирующих электронов в промежуток. Процесс развития высокопоточного разряда при этом, по сути, представляет собой переход коронального разряда в искровую.

Работа поддержана грантом РФФИ № 09-08-00374 и Междисциплинарным интеграционным проектом СО РАН № IS-42.

## Список литературы

- [1] Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1974. 256 с.
- [2] Ковальчук Б.М., Кремнев В.В., Поталицын Ю.Ф. Сильноточные наносекундные коммутаторы. Новосибирск: Наука, 1991. 176 с.
- [3] Петер Г. Электронные лавины и пробой в газах. М.: Мир, 1968. 391 с.
- [4] Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М.: Наука, 1991. 224 с.
- [5] Месяц Г.А., Королев Ю.Д. // УФН. 1986. Т. 148. Вып. 1. С. 101–122.
- [6] Королев Ю.Д., Месяц Г.А., Хузеев А.П. // Докл. АН СССР. 1980. Т. 253. № 3. С. 606–609.
- [7] Козырев А.В., Королев Ю.Д., Месяц Г.А., Новоселов Ю.Н., Шемякин И.А. ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1817–1822.
- [8] Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А. // ПТЭ. 1979. № 4. С. 162–164.
- [9] Mesyats G.A., Korovin S.D., Gunin A.V., Gubanov V.P., Stepchenko A.S., Grishin D.M., Landl V.F., Alekseenko P.I. // Laser Part. Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 197–209.
- [10] Быков Н.М., Гунин А.В., Коровин С.Д., Королев Ю.Д. // ПТЭ. 2008. № 6. С. 63–71.
- [11] Harrower J.A., MacGregor S.J., Tuema F.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1999. Vol. 32. N 7. P. 790–797.
- [12] Beveridge J.R., MacGregor S.J., Given M.J., Timoshkin I.V., Lehr J.M. // IEEE T. Dielect. and El. In. 2009. Vol. 16. N 4. P. 948–955.
- [13] Месяц Г.А., Коровин С.Д., Ростов В.В., Шнак В.Г., Яландин М.И. // Proc. of the IEEE. 2004. Vol. 92. N 7. P. 1166–1179.
- [14] Andreev Yu.A., Gubanov V.P., Efremov A.M., Koshelev V.I., Korovin S.D., Kovalchuk B.M., Kremnev V.V., Plisko V.V., Stepchenko A.S., Sukhushin K.N. // Laser Part. Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 211–217.
- [15] Яландин М.И., Шнак В.Г. // ПТЭ. 2001. № 3. С. 5–31.
- [16] Месяц Г.А., Яландин М.И. // УФН. 2005. Т. 175. Вып. 3. С. 225–246.
- [17] Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Vizir V.A., Kumpyak V.V., Zorin V.B., Kiselev V.N. // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81. N 10. Article Number 103506.
- [18] Омаров О.А., Рухадзе А.А. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 43–48.
- [19] Королев Ю.Д., Кузьмин В.А., Месяц Г.А. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 4. С. 699–704.
- [20] Козырев А.В., Королев Ю.Д. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 10. С. 2210–2213.
- [21] Анполонов В.В., Байцур Г.Г., Прохоров А.М., Фирсов К.Н. // Квант. электрон. 1987. Т. 14. № 1. С. 135–145.
- [22] Стишков Ю.К., Самусенко А.В., Субботский А.С., Ковалев А.Н. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 11. С. 21–28.