

УДК 533.9+621.384.6

СИЛЬНОТОЧНЫЕ ЭМИТТЕРЫ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ БЕСПОРОГОВОЙ ВЗРЫВНОЙ ЭМИССИИ

А. Е. Дубинов, С. А. Садовой, В. Д. Селемир

Российский Федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

Представлены схема и режимы работы компактного сильноточного эмиттера пучков заряженных частиц на основе беспороговой управляемой взрывной эмиссии. Электроны и положительно заряженные ионы вытягиваются электрическим полем из приповерхностной плазмы, образованной скользящим электрическим разрядом вдоль диэлектрика с высоким показателем диэлектрической проницаемости. Разряд при этом иницируется электрическим взрывом кромки электрода, примыкающего к диэлектрику. При величине вытягивающего напряжения ± 2 кВ плотность эмиссионного тока электронов достигла 725 А/см^2 , а положительно заряженных ионов — 325 А/см^2 .

Современное представление о механизме взрывной эмиссии электронов с металлических катодов [1, 2] заключается в следующем. При подаче импульса высокого напряжения с длительностью фронта $10^{-9} \div 10^{-7}$ с на вакуумный катод-анодный промежуток с катодных микроострий, которые являются концентраторами электрического поля, начинается интенсивная автоэлектронная эмиссия. Текущий по микроостриям ток быстро разогревает микроострия, приводя их к электрическому взрыву. В результате множества таких взрывов поверхность катода покрывается тонким слоем плотной плазмы, которая может обеспечить необходимую эмиссию электронов. Подчеркнем, что электрический взрыв обеспечивает лишь образование плазмы, имеющей большую эмиссионную способность, чем поверхность металла.

Хотя взрывная электронная эмиссия, осуществляемая по такой схеме, и не имеет конкуренции по величине плотности электронного тока среди других типов эмиссии, она имеет ряд недостатков, снижающих ее функциональные возможности.

Первый недостаток — пороговость процесса, связанная с достаточно высокой энергетикой электровзрыва микроострий, тогда как для некоторых приборов умеренной средней мощности требуются низкопороговые (а лучше — беспороговые) по величине вытягивающего напряжения 10—100 В.

Второй недостаток — отсутствие возможности вытягивания положительных ионов из электровзрывной плазмы. Действительно, первично взрываются лишь микроострия катода, а после взрыва быстро поменять полярность напряжения в диоде практически очень трудно.

Оба этих недостатка являются следствием одной общей причины — отсутствия в такой схеме управляемости процессом взрывной эмиссии, когда один и тот же импульс напряжения одновременно выполняет две функции, создавая взрывную плазму и ускоряя электроны из плазмы.

В данной работе сообщается, что схему взрывной эмиссии можно изменить так, чтобы одновременно добиться ее управляемости, беспороговости и возможности получения ионной эмиссии из плазмы, образованной в результате электрического взрыва.

Основная идея заключается в разделении функций создания плазмы и вытягивания заряженных частиц между двумя несвязанными друг с другом импульсами напряжения, а в качестве концентраторов электрического поля использовать не микроострия, а тройные точки “металл—диэлектрик—вакуум”.

Известно, что тройные точки, особенно в случае диэлектрика с большим значением диэлектрической проницаемости, усиливают вокруг себя электрическое поле. В результате этого поля с кромки металла, вблизи тройной точки, возникает интенсивная автоэлектронная эмиссия, вызывающая электрический взрыв вещества кромки, который, в свою очередь, может инициировать возникновение скользящего разряда вдоль поверхности диэлектрика.

Таким образом, согласно предлагаемой схеме эмиттер должен представлять собой систему из двух электродов, разделенных один от другого диэлектрическим изолятором. На эти электроды подается импульс управляющего напряжения, который в результате электровзрыва кромки одного из электродов (катодного) создает скользящий разряд вдоль поверхности диэлектрика. Поверхностная плазма скользящего разряда после замыкания межэлектродного промежутка шунтирует управляющее напряжение, после чего подав на дополнительный вытягивающий электрод импульс напряжения нужной полярности и амплитуды, можно получить пучок электронов или положительных ионов необходимой энергии.

Опираясь на эту идею, нами был разработан компактный сильноточный эмиттер с параметрами, не уступающими известным взрывоэмиссионным эмиттерам, но имеющий новые функциональные возможности, а именно, управляемость, беспороговость и возможность получения пучков положительных ионов. Схема разработанного эмиттера приведена на рис. 1.

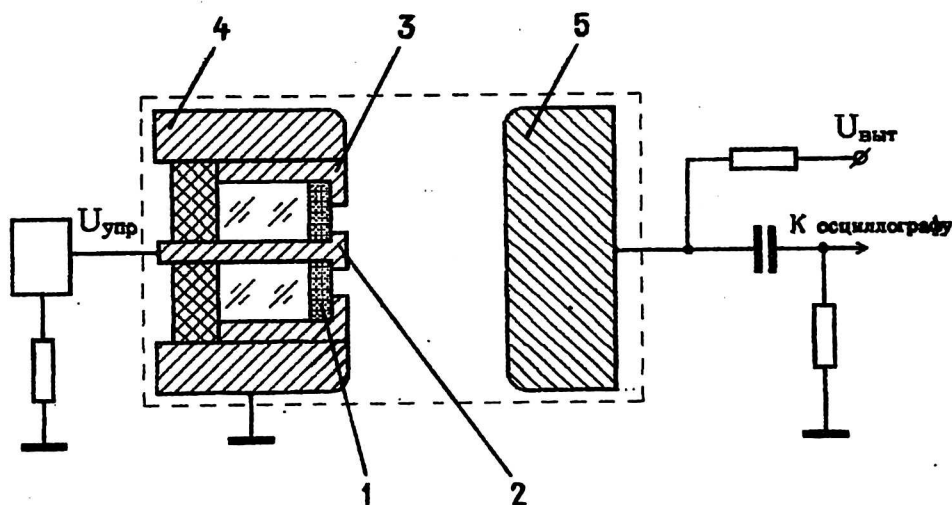


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — керамический диск; 2 — высоковольтный управляющий электрод скользящего разряда;
3 — заземленный электрод скользящего разряда; 4 — заземленный электрод вакуумного диода;
5 — вытягивающий электрод вакуумного диода

В качестве диэлектрика, на поверхности которого должна образовываться приповерхностная плазма при развитии электрического разряда, использовался диск из керамики титаната бария $BaTiO_3$ диаметром 15 мм и толщиной 2 мм. В центре диска имелось отверстие, в которое вставлялся высоковольтный электрод 2 эмиттера. Другой электрод 3 эмиттера охватывает керамический диск.

При такой конструкции эмиттера при подаче на электроды импульса высокого напряжения электрическое поле возникает в зазоре между ними вдоль поверхности керамического диска, особенно концентрируясь в тройных точках. В наших экспериментах зазор между электродами 2 и 3 составил 2 мм, а внешний диаметр кольца свободной поверхности керамики составил 8 мм.

Разработанный образец эмиттера испытывался в диоде, помещенным в вакуумную камеру (на рис. 1 не показана), которая представляла собой стеклянную трубу с внутренним диаметром 80 мм и с торцами, закрытыми герметичными фланцами. В камере поддерживался вакуум с остаточным давлением воздуха не более 10^{-4} торр. Эмиттер помещали в специальное углубление на одном из электродов диода 4, представляющем собой цилиндр из нержавеющей стали диаметром 70 мм. На расстоянии 36 мм от него располагался вытягивающий электрод — цилиндр из нержавеющей стали также диаметром 70 мм. Поверхности обоих электродов, направленные один к другому, были выполнены подобно профилю Роговского и отполированы.

На высоковольтный электрод 2 эмиттера подавались импульсы высокого напряжения положительной полярности со специального генератора. Этот генератор может формировать импульсы амплитудой 2 кВ и длительностью переднего фронта ~ 200 нс, после которого (на холостом ходу генератора, когда отсутствует нагрузка) должен следовать RC-спад с постоянной времени $\tau \sim 2$ мкс.

После подачи импульса в результате интенсивной автоэлектронной эмиссии на кромке электрода 3, сопряженной с тройной точкой, происходит кольцевой электрический взрыв, который инициирует развитие скользящего по поверхности диска 1 разряда. Через ~ 600 нс от момента запуска разряд по поверхности диска становится полностью завершенным, и напряжение пускового импульса резко обрывается (рис. 2, а). С этого момента начинает увеличиваться ток разряда на поверхности керамики. На рис. 2, б показана типичная осциллограмма тока разряда на поверхности диска. Величина этого тока была порядка 1 кА. Здесь надо отметить, что пусковой генератор должен обеспечивать соответствующий ток в режиме источника тока (замкнутый выход).

Если на вытягивающий электрод подать теперь положительное напряжение, то, спустя некоторое время после начала разряда, появляется электронный ток в диодном промежутке (см. рис. 2, в), полученный при вытягивающем напряжении +1,6 кВ. При отрицательном вытягивающем напряжении -1,6 кВ была зарегистрирована эмиссия положительных ионов. Типичная осциллограмма импульса эмиссии положительных ионов представлена на рис. 2, г.

В работе [3] спектральным методом был определен ионный состав приповерхностной плазмы при электрическом разряде вдоль поверхности диэлектрика. В состав плазмы тогда входили ионы материала диэлектрика и металлических электродов. Регистрируемый нами ионный эмиссионный ток положительных ионов из плазменного эмиттера, по-видимому, также является суммарным током всех перечисленных выше ионов (имеющих положительный заряд). Следовательно, для получения тока ионов одного сорта необходимо сочленять подобные системы с масс-сепараторами частиц.

Целью дальнейших экспериментов была регистрация эмиссионных токов при изменении вытягивающего напряжения и неизменных пусковом импульсе и катод-анодном расстоянии. Вытягивающее напряжение менялось в диапазоне от -1800 до +1800 В. Результаты этих изменений показаны на рис. 3.

При низких значениях вытягивающего напряжения скользящий разряд по поверхности диска локализовывался в тонком канале, но при увеличении вытягивающего напряжения до $\sim \pm 1$ кВ разряд формировался равномерно по всему открытому кольцу диска, и было хорошо видно свечение плазменного кольца.

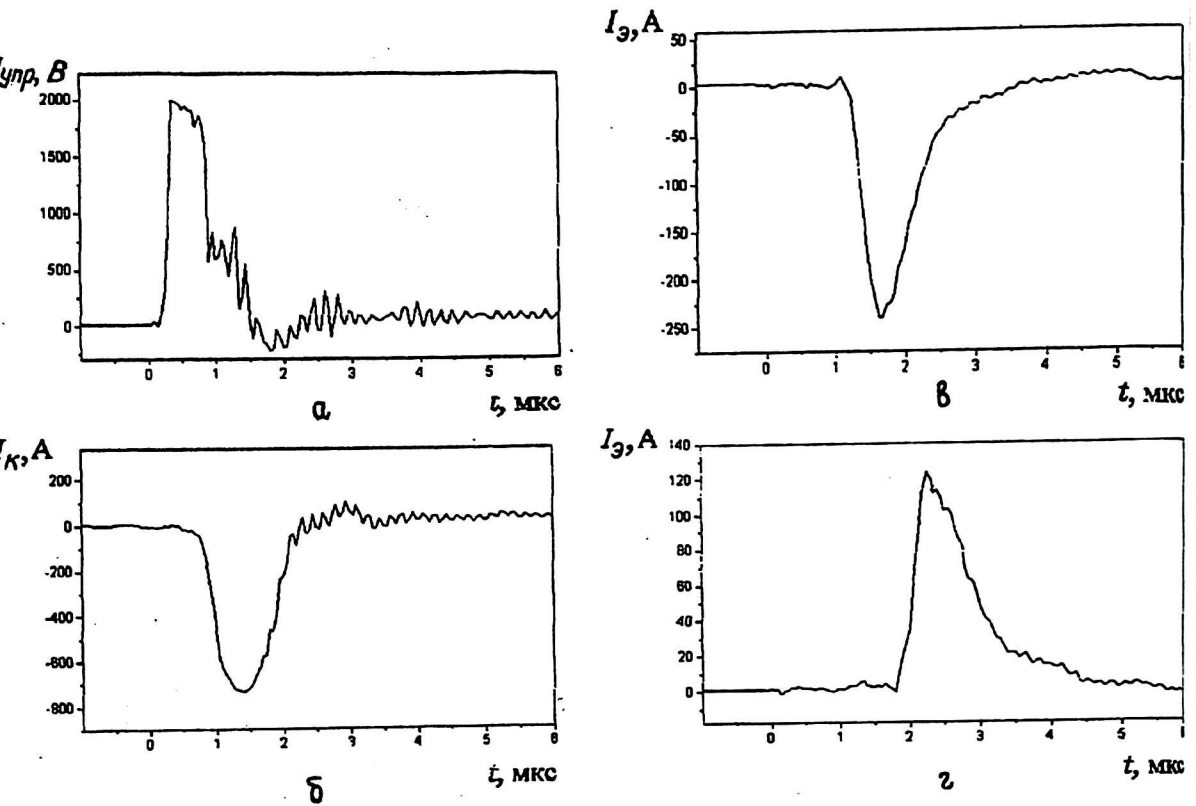


Рис. 2. Типичные осциллограммы:

- а — пусковой импульс; б — ток разряда вдоль поверхности керамики;
 в — ток эмиссии электронов при вытягивающем напряжении +1600 В;
 г — ток эмиссии ионов при вытягивающем напряжении -1600 В

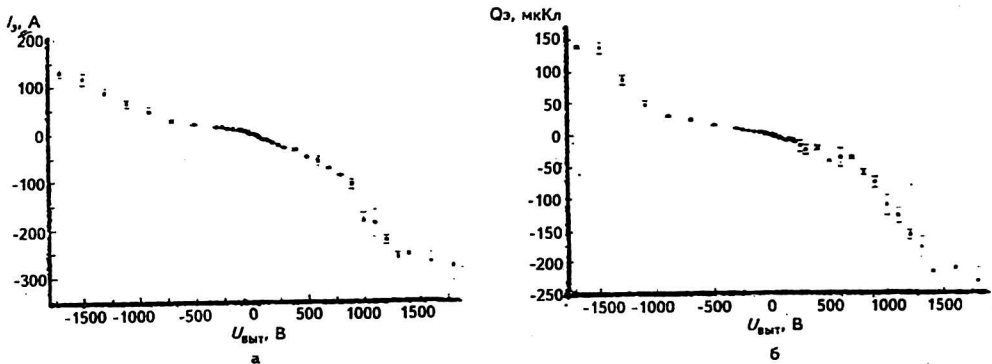


Рис. 3. Графики зависимости эмиссии заряженных частиц от величины вытягивающего напряжения:

- а — для тока эмиссии; б — для заряда, переносимого заряженными частицами в течение одного импульса. $Q_{отц}$ — отрицательная составляющая тока и заряда эмиссии соответствует электронам, $Q_{отп}$ — положительная — положительно заряженным ионам

При амплитуде напряжения пускового импульса 2 кВ и величине вытягивающего напряжения ± 2 кВ были получены следующие параметры эмиттера:
 максимальный эмиссионный ток электронов ~ 290 А;
 максимальный эмиссионный ток ионов ~ 130 А;
 максимальная плотность эмиссионного тока электронов ~ 725 А/см²;
 максимальная плотность эмиссионного тока ионов ~ 325 А/см²;
 максимальный заряд, переносимый электронами за импульс, ~ 230 мкКл;
 максимальный заряд, переносимый ионами за импульс, ~ 140 мкКл;
 максимальная плотность заряда переносимого электронами за импульс, ~ 575 мкКл/см²;
 максимальная плотность заряда переносимого ионами за импульс, ~ 350 мкКл/см².

Был также реализован импульсно-периодический режим работы разработанного эмиттера с частотой следования высоковольтных управляющих импульсов 50 Гц. Примерно после 1,5 ч непрерывной работы установки ($3 \cdot 10^5$ срабатываний) при вытягивающем напряжении +2 кВ замечено ухудшение эмиссионных свойств эмиттера. Это выражается в том, что эмиттер перестает срабатывать в 30 % включений. Ухудшения связаны с тем, что поверхность керамики покрывается черным налетом, который мешает формированию разряда. Налет равномерно распределен по всей поверхности керамики, что, по-видимому, свидетельствует о том, что он является продуктом разложения керамики. Если поверхность диска отшлифовать, сняв налет, то эмиттер полностью восстанавливает свои эмиссионные свойства.

Таким образом, образец может работать сериями по $3 \cdot 10^5$ срабатываний до тех пор, пока не выгорит вся керамическая таблетка. Эмиттеры, которые имеют электроды в виде тонкого металлического покрытия, не могут быть оживлены подобным образом, так как все покрытие будет при этом уничтожено.

Представленное в данной работе устройство на основе беспороговой управляемой взрывной эмиссии электронов и положительно заряженных ионов имеет высокую эмиссионную способность, превосходя по своим параметрам известные эмиттеры, работающие при аналогичных вытягивающих напряжениях. Подобный класс эмиттеров может использоваться для получения сильноточных ионных и электронных пучков при малой величине вытягивающего электрического поля в различных технологических приложениях.

Л и т е р а т у р а

1. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный электрический разряд в вакууме. — Новосибирск: Наука, 1984. — 256 с.
2. Сливков И. Н. Процессы при высоком напряжении в вакууме. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 256 с.
3. Бугаев С. П., Месяц Г. А. // ДАН СССР. 1971. Т. 196 № 2. С. 324.

HIGH-CURRENT EMITTERS OF THE CHARGED PARTICLES BASED ON THRESHOLDLESS CONTROLLED EXPLOSIVE EMISSION

A. E. Dubinov, S. A. Sadovoy, V. D. Selemir

The Russian Federal Nuclear Centre — All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

The construction is submitted and the modes of operations of the compact high-current emitter of beams of the charged particles based on thresholdless controlled explosive emission are described. The electrons and the positively charged ions are extracted by an electrical field from of surface flashover plasma formed by the sliding electrical discharge on dielectrics with a high dielectric constant. The discharge is initiated by electrical explosion of cathode edge which is contiguous to dielectrics. At size of an extracting voltage ± 2 kV density of an emission current of electrons has reached 725 A/cm², and of positively charged ions 325 A/cm².