



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.6>

УДК: 537.525

17-я Международная конференция

«Газоразрядная плазма и ее применения»

Екатеринбург, Россия, 8-12 сентября 2025

МЕТОДЫ ЗАПУСКА ПСЕВДОИСКРОВОГО РАЗРЯДНИКА С УЗЛОМ ЗАПУСКА НА ОСНОВЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА

Н.В. Ландль, Ю.Д. Королев, О.Б. Франц, А.В. Болотов, В.О. Нехорошев

Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055, Томск, пр. Академический 2/3

Статья поступила в редакцию 2 октября 2025 г.

Аннотация. Настоящая работа посвящена исследованию методов запуска отпаянного псевдоискрового разрядника с узлом запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда в условиях, когда импульс запуска имеет отрицательную полярность. Показано, что схема питания и режимы поддержания вспомогательного разряда оказывают существенное влияние на времена запаздывания срабатывания разрядника и разброс времен срабатывания. Дано объяснение причинам данного влияния. Выявлены схемы запуска и схемы питания вспомогательного разряда, для которых обеспечивается наносекундная стабильность срабатывания разрядника.

Ключевые слова: псевдоисковой разрядник, разряд с полым катодом, тлеющий разряд.

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00405, <https://rscf.ru/project/25-19-00405/>.

Автор для переписки: Ландль Николай Владимирович, landl@lnp.hcei.tsc.ru

Введение

В настоящее время наблюдается значительный интерес к разрядам низкого давления газа, обусловленный широким спектром их применения [1-13]. В частности, речь идет о системах для модификации поверхности металлических и диэлектрических материалов, для генерации электронных и ионных пучков, для генерации жесткого ультрафиолетового излучения.

Также стационарные и импульсные разряды низкого давления применяются в высокоточных коммутрующих приборах – псевдоискровых разрядниках [1, 14-16]. Эти приборы предназначены для коммутации импульсных токов на уровне нескольких килоампер и выше. Конструкция разрядника схожа с конструкцией классического водородного тиратрона с накаливаемым катодом. Однако в разрядниках вместо накаливаемого используется холодный (плазменный) катод. Поэтому псевдоискровые разрядники также называют тиратронами с холодным катодом.

Конструктивно разрядник состоит из основного высоковольтного промежутка, включающего в себя полый или плоский анод и полый катод, и специального узла запуска. Узел запуска обычно располагается в заземленной полости основного катода, и предназначен для генерации плазмы в основной катодной полости в заданный момент времени. Электроны с поверхности этой плазмы извлекаются в основной высоковольтный промежуток под действием анодного напряжения, что приводит к генерации плазмы в основном промежутке и запуску прибора [1].

В настоящее время разработаны различные варианты узлов запуска [1, 17-21], однако наибольшее распространение получили узлы запуска на основе пробоя по поверхности диэлектрика или полупроводника и узлы запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда. В последнем случае узел запуска включает в себя два полых симметричных электрода, между которыми поддерживается стационарный тлеющий разряд [1,16]. Напряжение источника питания для поддержания разряда, в общем случае, может иметь как положительную, так и отрицательную полярность, и прикладываться к любому из электродов узла

запуска. Для инициирования разряда в основном высоковольтном промежутке к одному из электродов узла запуска прикладывается импульс напряжения амплитудой в несколько киловольт (импульс запуска). Полярность импульса запуска также может быть как положительной, так и отрицательной. Таким образом может быть реализовано 16 различных схем запуска разрядника.

Целью настоящей работы является исследование методов запуска отпаянного псевдоискрового разрядника при различных полярностях напряжения питания вспомогательного разряда и отрицательной полярности импульса запуска.

1. Методы поддержания вспомогательного тлеющего разряда в узле запуска

Схематическое изображение конструкции разрядника и двух возможных схем запуска приведено на рис. 1.

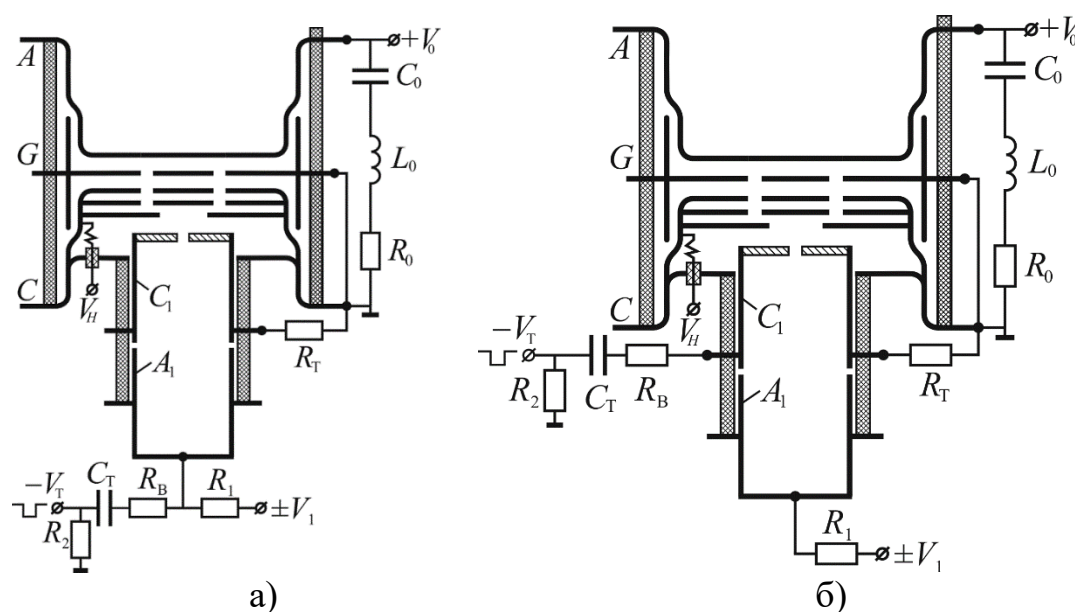


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции псевдоискрового разрядника, схем питания вспомогательного разряда и схем запуска, когда источник питания вспомогательного разряда подключен к электроду A_1 .

$$V_0 \leq 25 \text{ кВ}, C_0 = 5.5 \text{ нФ}, L_0 = 20 \text{ нГн}, R_0 = 15 \text{ Ом}, R_T = (1-5) \text{ кОм}, \\ R_1 = 55 \text{ кОм}, R_B = 50 \text{ Ом}, R_2 = 150 \text{ Ом}, C_T = 2 \text{ нФ}.$$

Как отмечалось во введении, основной высоковольтный промежуток включает в себя плоский анод A и полый катод C сложной формы. В данном приборе применена двухсекционная конструкция основного промежутка, когда между электродами A и C имеется градиентный электрод G , что позволило

увеличить рабочее анодное напряжение V_0 до 50 кВ. Расстояние между плоскими частями электродов и диаметры отверстий в них соизмеримы, и составляют (2.5-4) мм. Как и в классических тиратронах с накалимым катодом, рабочее давление в приборе поддерживается за счет генератора водорода, на нагреватель которого подается напряжение $V_H = (5-7)$ В при токах на уровне около 2 А.

В текущих экспериментах градиентный электрод был соединен с основной катодной полостью. В этих условиях, фактически, мы имеем дело с односекционным прибором с катодной полостью сложной формы. Напряжение на генераторе водорода выбиралось таким образом ($V_H = 6.1$ В), чтобы пробой в основном промежутке происходил при напряжении $V_0 = 25$ кВ.

Нижняя секция основного промежутка GC сообщается с катодной полостью через отверстия в верхней плоскости электрода C . Диаметр отверстий соизмерим с межэлектродным расстоянием секций основного промежутка. В полости электрода C расположены две перегородки с отверстиями. Толщина перегородок составляет 2 мм, а диаметр осевого отверстия в нижней перегородке 16 мм.

Узел запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда состоит из полых электродов A_1 и C_1 . Электроды имеют внутренний диаметр 36 мм и глубину 45 мм каждый. Расстояние между доньшками полостей составляет 92 мм. Диаметр отверстия в электроде C_1 составлял 5 мм, а толщина плоской части электрода была 4 мм. Расстояние от электрода C_1 до нижней перегородки в электроде C составляло 4 мм.

Разряд в узле запуска поддерживается за счет источника питания V_1 , при этом средний ток разряда в экспериментах составлял (10-30) мА. Полярность напряжения источника питания может быть как положительной, так и отрицательной, и это напряжение может прикладываться как к электроду C_1 , так и к электроду A_1 . Основная доля тока вспомогательного разряда i_1 протекает между электродами C_1 и A_1 . Однако, поскольку узел запуска сообщается с основной катодной полостью C через отверстие в электроде C_1 , некоторая доля тока разряда i_2 неизбежно будет протекать на полость C . Это так называемый

паразитный ток [1,16,22,23]. Поскольку электроды узла запуска симметричны, вольтамперная характеристика вспомогательного разряда является идентичной независимо от того, к какому из электродов узла запуска прикладывается напряжение V_1 . Однако величина паразитного тока и механизмы его формирования существенно отличаются в зависимости от схемы питания, что, как будет показано ниже, влияет на процессы инициирования разряда в основном промежутке.

Пример вольтамперной характеристики и зависимости паразитного тока от полного тока разряда $i = i_1 + i_2$ при различных схемах питания вспомогательного разряда приведены на рис. 2а. Для электрической цепи на рис. 1 при $+V_1$ полость A_1 является полым анодом, а полость C_1 играет роль полого катода. Соответственно, в полости A_1 располагается плазма положительного столба, а в полости C_1 – область отрицательного свечения. В исследуемых экспериментальных условиях разряд в узле запуска поддерживался в режиме обычного тлеющего разряда [23]. В рассматриваемых условиях область отрицательного свечения формируется так, что размер области катодного падения потенциала оказывается больше, чем диаметр отверстия в электроде C_1 . Соответственно плазма отрицательного свечения не генерируется в области отверстия, и вспомогательный разряд не перехватывается на полость C . Тогда паразитный ток обеспечивается ионами из плазмы отрицательного свечения, которые ускоряются в области катодного падения потенциала и выходят через отверстие в промежуток между электродами C и C_1 . Кроме того, в цепи питания разряда присутствует сопротивление R_T , поэтому потенциал электрода C_1 оказывается положительным относительно заземленной полости C . В результате ионы приобретают дополнительную энергию в промежутке C - C_1 . Как видно из рис. 2а, паразитный ток в данном случае практически линейно возрастает с ростом полного тока разряда. При этом величина тока i_2 не превышает 50 мкА в широком диапазоне тока i . Поэтому, наличие паразитного тока в данном случае не приводит к существенному снижению пробивного напряжения основного высоковольтного промежутка (рис. 2 б).

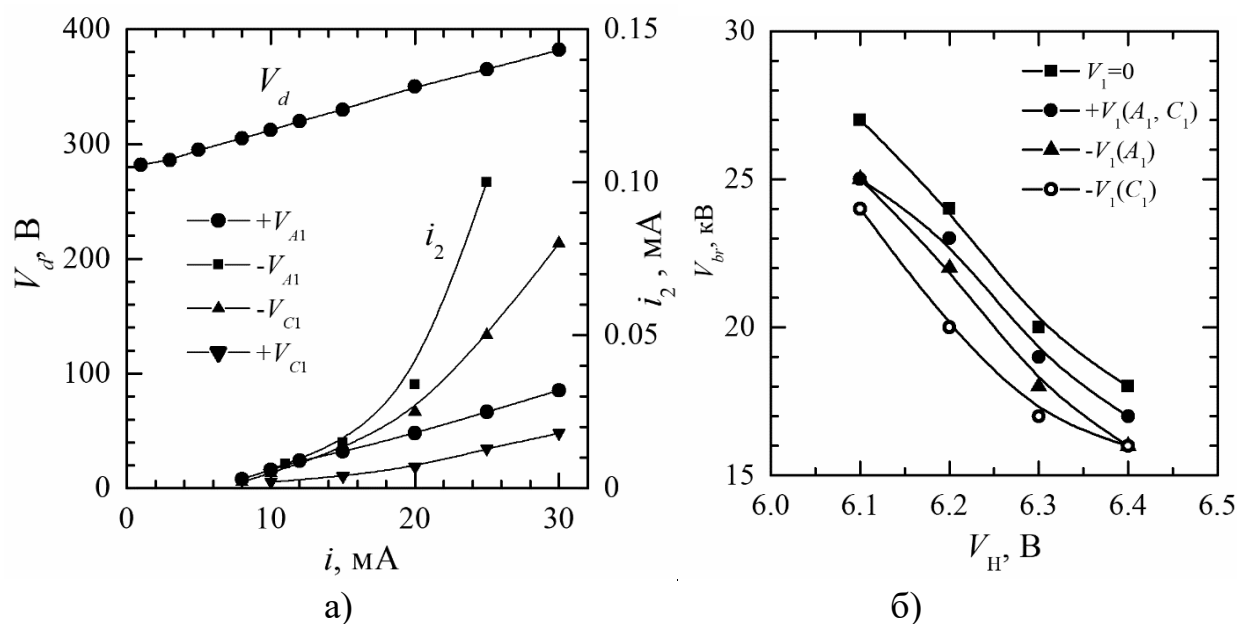


Рис. 2. Вольтамперная характеристика вспомогательного разряда $V_d(i)$ и зависимости паразитного тока от полного тока разряда $i_2(i)$ при различных схемах питания вспомогательного разряда (а); зависимости пробивного напряжения промежутка AG от напряжения на генераторе водорода при различных схемах питания вспомогательного разряда (б).

При отрицательной полярности напряжения V_1 (рис. 1) полость C_1 играет роль полого анода, в котором располагается область положительного столба разряда. В этих условиях ток разряда на электрод C_1 обеспечивается главным образом электронами из плазмы положительного столба, которые смогли преодолеть отрицательный потенциальный барьер между плазмой столба и анодом [1,23]. Для типичных условий поддержания разряда в узле запуска размер области анодного падения потенциала оказывается сравним с радиусом отверстия в электроде C_1 , и плазма положительного столба может проникать в область отверстия. Поток электронов с границы этой плазмы и формирует паразитный ток.

Как и для случая $+V_1$ на рис. 1, в рассматриваемых условиях за счет сопротивления R_T потенциал электрода C_1 отличен от потенциала земли. Однако в данном случае он отрицателен. Тогда полость C играет роль извлекающего электрода для электронов из плазмы столба. Из рис. 2а видно, что паразитный ток существенно возрастает с ростом полного тока разряда. При токе $i > 25$ мА паразитный ток скачком увеличивается до величины в несколько миллиампер,

что говорит о частичном перехвате полного тока вспомогательного разряда на полость C . В этом случае ток на электрод C следует рассматривать не как паразитный ток, а как ток разряда, замыкающегося на анод сложной формы C_1 - C . Ясно, что в этих условиях обеспечивается эффективная генерация плазмы в основной катодной полости C , что может, в общем случае, приводить к снижению пробивного напряжения основного промежутка. Однако, за счет корректного выбора величины сопротивления R_T (для данной схемы питания $R_T = 1$ кОм) и, соответственно, величины потенциала электрода C_1 , можно выбрать условия, в которых присутствие плазмы разряда не будет существенно влиять на пробивное напряжение основного промежутка. Кроме того, как видно из рис. 1, в полости C присутствуют специальные перегородки, за счет которых обеспечивается экранирование основного промежутка от плазмы вспомогательного разряда.

Псевдоискровой разрядник также может работать с использованием электрических цепей, в которых напряжение V_1 подается на электрод C_1 (рис. 3). Для случая, когда напряжение V_1 имеет положительную полярность, полость C_1 также играет роль полого анода. Как отмечалось ранее, отличительной особенностью разряда с полым анодом является отрицательное падение напряжения на аноде. Основная часть тока, поступающего на поверхность анода это электронный ток. В то же время к аноду поступает слабый ионный ток, и именно благодаря этому току поддерживается отрицательное падение напряжения на аноде.

Поскольку ток на поверхности анода замыкается за счёт потока электронов, можно сделать вывод, что паразитный ток на электроде C также возникает из-за электронов. Однако следует обратить внимание на то, что электрод C_1 находится под положительным потенциалом по отношению к заземлённой полости C . Электроны не могут достичь электрода C , и паразитный ток определяется потоком ионов из плазмы положительного столба. Как и для электрической цепи на рис. 1 при $-V_1$, в данном случае паразитный ток практически линейно возрастает с ростом полного тока, и не превышает 20 мкА.

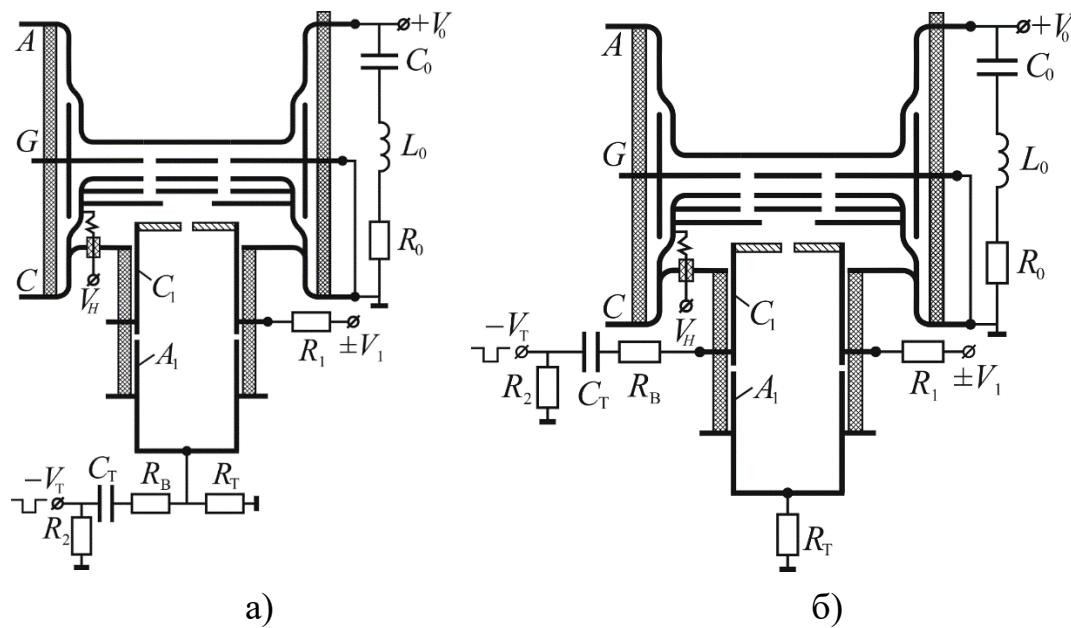


Рис. 3. Схематическое изображение конструкции псевдоискрового разрядника, схем питания вспомогательного разряда и схем запуска, когда источник питания вспомогательного разряда подключен к электроду C_1 .
 $V_0 \leq 25$ кВ, $C_0 = 5.5$ нФ, $L_0 = 20$ нГн, $R_0 = 15$ Ом, $R_T = (1-5)$ кОм,
 $R_1 = 55$ кОм, $R_B = 50$ Ом, $R_2 = 150$ Ом, $C_T = 2$ нФ.

Еще одна схема питания вспомогательного разряда соответствует условиям, когда к электроду C_1 прикладывается отрицательное напряжение питания V_1 (рис. 3). Формально, когда источник питания $-V_1$ подключён к электроду C_1 , с точки зрения режима работы разряда мы имеем те же условия, что и на рис. 1 при $+V_1$. Полость C_1 заполнена плазмой отрицательного тлеющего разряда, и поток ионов должен проходить через отверстие в пространстве между электродами C_1 и C . Однако следует учитывать, что на электроде C_1 присутствует отрицательный потенциал. Поэтому ионы не могут достичь электрода C . Эксперименты показывают, что паразитный ток i_2 в данном случае определяется электронами. По нашему мнению, электронный ток возникает в зазоре между электродами C_1 и C из-за вторичных процессов на поверхности электрода C_1 . В частности, внутренняя поверхность отверстия в плоской части электрода C_1 подвергается ионной бомбардировке, в результате чего возникают вторичные электроны. Эти электроны легко извлекаются на электрод C , создавая тем самым паразитный электронный ток. Кроме того, на внутренней поверхности отверстия могут возникать вторичные электроны в результате

фотоэффекта. Тем не менее, в отличие от случая на рис. 1 при $+V_1$, перехвата тока вспомогательного разряда на полость C не происходит, а паразитный ток при полном токе разряда $i = 30$ мА составляет $i_2 = 80$ мкА (рис. 2а).

Таким образом, в зависимости от схемы питания вспомогательного разряда в узле запуска паразитный ток может переноситься как электронами, так и ионами. Наличие разряда в узле запуска и, соответственно, паразитного тока, приводит лишь к небольшому уменьшению напряжения статического пробоя. Тем не менее, наибольшее влияние вспомогательного разряда соответствует схемам, в которых паразитный ток переносится электронами (рис. 2б).

2. Методы запуска разрядника

Как отмечалось выше, импульс запуска для данной конструкции разрядника может прикладываться как к электроду A_1 , так и к электроду C_1 , и может иметь как положительную, так и отрицательную полярность. Однако в данной работе мы ограничиваемся только случаями, в которых импульс запуска имеет отрицательную полярность. Рассмотрим методы запуска более детально.

Принцип работы схемы запуска, представленной на рис. 1а при $+V_1$, состоит в следующем. В начальных условиях в узле запуска поддерживается тлеющий разряд, а к аноду A приложено высокое напряжение $V_0 = 25$ кВ. В момент времени t_0 к электроду A_1 прикладывается импульс запуска V_T амплитудой 5 кВ и фронтом 20 нс (рис. 4). Под действием импульса запуска происходит интенсификация вспомогательного разряда и зажигание сильноточного импульсного разряда запуска [22]. Поскольку импульс запуска имеет отрицательную полярность, полость A_1 становится полым катодом, а полость C_1 – полым анодом. В результате в промежуток C - C_1 происходит инжекция пучка электронов с поверхности плазмы положительного столба в полости C_1 , что приводит к перехвату тока разряда запуска на основную катодную полость C в момент времени t_1 . Как следствие, в полости C обеспечивается эффективная генерация плазмы, что приводит к инициированию разряда в основном промежутке и срабатыванию разрядника в момент времени t_d [1].

Из осциллограмм на рис. 4 видно, что время запаздывания пробоя в основном промежутке относительно момента приложения импульса запуска в данных условиях $t_d = 100$ нс. При этом обеспечивается наносекундная стабильность срабатывания разрядника с разбросом $\Delta t_d = \pm 1$ нс.

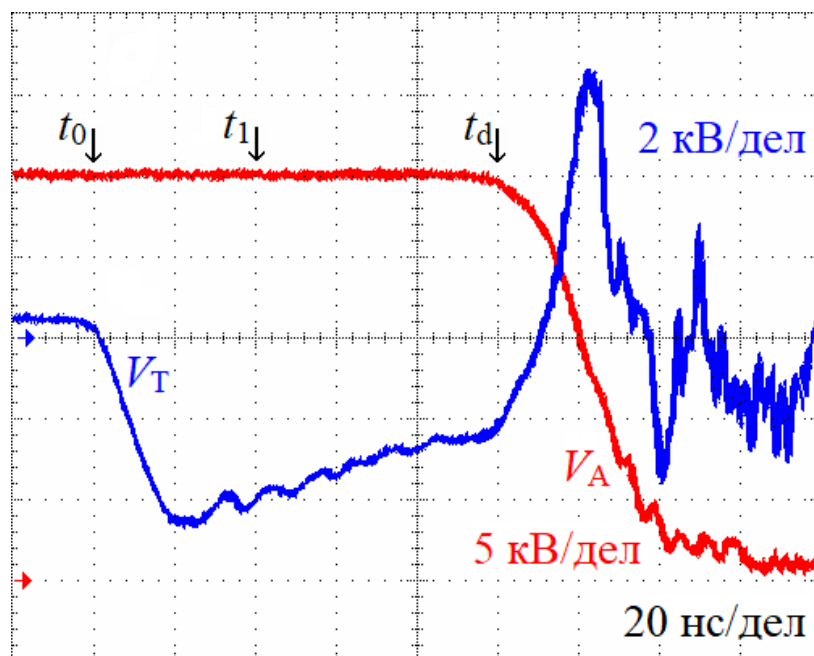


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на аноде разрядника V_A и импульса запуска V_T , иллюстрирующие метод запуска разрядника при использовании электрической схемы на рис. 1а.

При изменении полярности источника питания V_1 общий принцип запуска не меняется. Однако в данном случае при приложении импульса запуска к электроду A_1 не происходит перестройки разряда. Под действием импульса запуска происходит интенсификация разряда в узле запуска и обеспечивается перехват тока заряда запуска на электрод C . В результате время запаздывания пробоя t_d снижается до 90 нс. При этом стабильность срабатывания разрядника также оказывается $\Delta t_d = \pm 1$ нс.

Для схемы, представленной на рис. 3а при $-V_1$ в начальных условиях полость C_1 является полым катодом, и паразитный ток на электрод C обеспечивается ионами из плазмы отрицательного свечения. При приложении импульса запуска к электроду A_1 происходит пробой промежутка A_1 - C и зажигание разряда запуска, для которого полость C играет роль полого анода. Напомним, что во время приложения импульса V_T в узле запуска поддерживается

вспомогательный разряд. Поэтому пробой промежутка A_1 - C происходит с малым временем запаздывания. При положительной полярности V_1 (рис. 3б) принцип работы схемы запуска не меняется. Обе схемы запуска обеспечивают времена запаздывания пробоя в основном промежутке $t_d = 90$ нс, при этом обеспечивается наносекундная стабильность срабатывания разрядника ($\Delta t_d = \pm 1$ нс).

Для электрических схем, представленных на рис. 1б и рис. 3б запуск прибора происходит за счет интенсификации паразитного тока под действием импульса запуска. Формально можно говорить о том, что для данных схем под действием импульса запуска происходит пробой промежутка C - C_1 , в котором протекает слабый паразитный ток. Однако, в отличие от схемы на рис. 3а, здесь величина промежутка оказывается чрезвычайно мала. Действительно, для случая на рис. 3а расстояние между доньшком полости A_1 и средней перегородкой в полости C составляет 102 мм, в то время как для условий рис. 1б и рис. 3б зажигание разряда запуска должно произойти в промежутке длиной 8 мм. Поскольку условия работы прибора соответствуют левой ветви кривой Пашена, зажигание разряда по длинному пути происходит при меньших напряжениях. В нашем случае величина пробивного напряжения ограничена амплитудой импульса запуска, поэтому развитие пробоя по длинному пути происходит за меньшее время.

Для схемы на рис. 1б при $+V_1$ полость C_1 является катодом, однако она находится под положительным потенциалом, и паразитный ток переносится ионами. При приложении импульса запуска полость C_1 оказывается под отрицательным потенциалом. Поскольку паразитный ток в данных условиях мал (около 30 мкА), зажигание разряда запуска в промежутке C - C_1 происходит с временем запаздывания около 260 нс. В этих условиях время запаздывания срабатывания разрядника $t_d = 400$ нс, а разброс превышает ± 30 нс.

Когда полярность источника питания V_1 отрицательная, паразитный ток обеспечивается электронами. Как видно из рис. 2а, при полном токе разряда $i < 10$ мА, величина паразитного тока оказывается на уровне 50 мкА. В этих условиях процесс зажигания разряда запуска в промежутке C - C_1 схож

со случаем положительной полярности напряжения источника питания V_1 . Время запаздывания зажигания разряда запуска составляет приблизительно 250 нс, а времена запаздывания пробоя в основном промежутке $t_d = 400$ нс при разбросе времен срабатывания более 20 нс.

Ситуация кардинально меняется, когда ток вспомогательного разряда частично замыкается на полость С. Как отмечалось выше, в данном случае ток на полости С следует рассматривать не как паразитный ток, а как долю тока вспомогательного разряда. Причем величина этого тока превышает 10 мА. В данных условиях можно говорить об интенсификации разряда в промежутке С-С₁, и время запаздывания зажигания разряда запуска оказывается на уровне 30 нс. Соответственно, время запаздывания срабатывания разрядника оказывается существенно меньше по сравнению со случаем $+V_1$, и составляет $t_d = 80 \pm 1$ нс.

Метод запуска разрядника для схемы на рис. 3б схож с условиями рис. 3а при $+V_1$. Здесь, вне зависимости от напряжения источника питания V_1 паразитный ток оказывается менее 100 мкА. В данном случае при приложении импульса запуска зажигания разряда запуска и перехвата тока разряда на основную катодную полость не происходит. Весь ток разряда под действием импульса запуска протекает между электродами А₁ и С₁. Соответственно, плазма разряда не проникает в полость основного катода, и разрядник не запускается.

Для большей наглядности, данные по временам запаздывания срабатывания разрядника относительно момента приложения импульса запуска t_d и разброс времен срабатывания Δt_d для всех исследованных схем приведены в таблице 1. Для столбца рис. 1б при $-V_1$ в скобках указаны значения для случая, когда ток вспомогательного разряда перехватывается на электрод С.

Таблица 1. Времена запаздывания срабатывания разрядника относительно момента приложения импульса запуска t_d и разброс времен срабатывания Δt_d при различных схемах запуска и питания вспомогательного разряда.

	Рис. 1а		Рис. 1б		Рис. 3а		Рис. 3б	
	$+V_1$	$-V_1$	$+V_1$	$-V_1$	$+V_1$	$-V_1$	$+V_1$	$-V_1$
t_d , нс	100	90	400	360 (80)	140	96	∞	∞
Δt_d , нс	± 1	± 1	± 30	$\pm 30 (\pm 1)$	± 1	± 1		

Заключение

Проведены испытания восьми схем запуска псевдоискрового разрядника с узлом запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда при различных полярностях напряжения источника питания разряда вспомогательного разряда и отрицательной полярности импульса запуска. Показано, что режим поддержания вспомогательного разряда и, соответственно, режим протекания паразитного тока, оказывают существенное влияние на времена запаздывания срабатывания разрядника.

Выявлено, что минимальные времена запаздывания срабатывания разрядника и наносекундная стабильность срабатывания соответствуют схемам, в которых напряжение питания вспомогательного разряда и импульс запуска прикладываются к электроду A_1 узла запуска и для условий, когда ток вспомогательного разряда перехватывается на основную катодную полость C .

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00405, <https://rscf.ru/project/25-19-00405/>

Литература

1. Korolev Y. D., Koval N. N. Low-pressure discharges with hollow cathode and hollow anode and their applications // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2018. – V. 51. – P. 323001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aacf10>
2. Denisov V. V., Akhmadeev Y. H., Koval N. N. et al. The source of volume beam-plasma formations based on a high-current non-self-sustained glow discharge with a large hollow cathode // Phys. Plasmas. – 2019. – V. 26. – P. 123510. <https://doi.org/10.1063/1.5126485>
3. Abe S., Takahashi K., Mukaigawa S. et al. Comparison of plasma characteristics of high-power pulsed sputtering glow discharge and hollow-cathode discharge // Japan. J. Appl. Phys. – 2021. – V. 60. – P. 015501. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/abcd78>

4. Koval N. N., Devyatkov V. N., Vorobyev M. S. Electron Sources with Plasma Grid Emitters: Progress and Prospects // Russ. Phys. J. – 2021. – V. 63. – P. 1651-1660. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02219-3>
5. Akishev Y., Aponin G., Karalnik V. et al. Three-electrode strongly overvoltage open discharge in D2 as an effective source of the high-current beam of runaway electrons with energy up to 25 keV // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2018. – V. 51. – P. 394003. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad704>
6. Akishev Y., Balakirev A., Karal'nik V. et al. On the Mechanism of Maintenance and Instability of the Overvoltage Low-Pressure Discharge Forming a High-Current Runaway Electron Beam // Russ. Phys. J. – 2017. – V. 60. P. 1341-1345. <https://doi.org/10.1007/s11182-017-1219-z>
7. Sarkar M., Kumar N. Pseudospark Discharge-Based Electron Beam Sources: A Review // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2024. – V. 52. – № 6. – P. 1966-1982. <https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3418467>
8. Ryabchikov A. I., Dektyarev S. V., Korneva O. S. et al. Features of the Formation of Ultralow Energy High-Intensity Metal and Gaseous Ion Beams // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2021. – V. 49. P. 2559-2566. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3083327>
9. Qu D., Bleiner D. Extreme ultraviolet plasma spectroscopy of a pseudospark XUV source // J. Anal. At. Spectrom. – 2022. – V. 35. – № 9. P. 2011-2022. <https://doi.org/10.1039/D0JA00215A>
10. Bergmann K., Vieker J., Wezyk A. Investigations on the emission in the extreme ultraviolet of a pseudospark based discharge light source // J. Appl. Phys. – 2016. – V. 120. – № 14. – P. 143302. <https://doi.org/10.1063/1.4964800>
11. Rizakhanov R. N. Method for calculating an electron gun forming an axially symmetric beam // Journal of Radio Electronics. – 2024. – № 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.16>

12. Захаров А. А., Потапов А. А., Швачко А. А. Влияние электронной температуры на распределение концентрации в поперечном сечении газоразрядной плазмы // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.2.3>
13. Банковский А. С., Захаров А. А., Потапов А. А. и др. Влияние тепловых потоков в газоразрядной плазме на ее электрические свойства // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.2>
14. Lamba R. P., Pal U. N., Meena B. L. et al. A sealed-off double-gap pseudospark switch and its performance analysis // Plasma Sources Sci. Technol. – 2018. – V. 27. – № 3. – P. 035003. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aaab80>
15. Yan J., Shen S., Ding W. et al. A Miniaturized Sealed-Off Double-Gap Pseudospark Switch for High Power and High Repetition Rate Pulsed Discharge Applications // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2023. – V. 59. – № 3. P. 3056-3066. <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3247401>
16. Korolev Y. D., Landl N. V., Frants O. B. et al. A sealed-off pseudospark switch with nanosecond stability of triggering // IEEE Trans. Electron Devices. – 2021. – V. 68. – № 9. – P. 4692-4697. <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3096182>
17. Mishra A., Meena B. L., Lamba R. P. et al. Performance Evaluation of Ferroelectric Trigger Unit for Multigap Multiaperture Pseudospark Switch // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2024. – V. 52. – № 9. P. 4606-4612. <https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3458997>
18. Mehr T., Arentz H., Bickel P. et al. Trigger devices for pseudospark switches // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1995. – V. 23. – № 3. – P. 324-329. <https://doi.org/10.1109/27.402320>
19. Sozer E. B., Gundersen M. A., Jiang C. Q. Magnesium-based photocathodes for back-lighted thyratrons // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2012. – V. 40. – № 6. – P. 1753-1758. <https://doi.org/10.1109/TPS.2012.2190829>

20. Landl N. V., Korolev Y. D., Frants O. B. et al. Discharge formation in a trigger unit based on a breakdown over the dielectric surface in a cold-cathode thyatron // *Rus. Phys. J.* – 2022. – V. 65. – № 2. – P. 347–354. <https://doi.org/10.1007/s11182-022-02642-0>
21. Korolev Y. D., Landl N. V., Frants O. B. et al. Mechanism of triggering for the pseudospark switch with a trigger unit based on surface discharge // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2023. – V. 87. – P. S257–S261. <https://doi.org/10.1134/S1062873823704713>
22. Korolev Y. D., Landl N. V., Frants O. B. et al. Study of trigger mechanisms of a pseudospark switch configuration with a steady-state auxiliary glow discharge // *Physics of Plasmas.* – 2023. – V. 30. – P. 093501. <https://doi.org/10.1063/5.0155949>
23. Korolev Y. D., Landl N. V., Frants O. B. et al. Operating modes in a low-pressure glow discharge with hollow cathode // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2022. – V. 31. – № 7. – P. 074002. <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac7902>

Для цитирования:

Ландль Н.В., Королев Ю.Д., Франц О.Б., Болотов А.В., Нехорошев В.О. Методы запуска псевдоискрового разрядника с узлом запуска на основе вспомогательного тлеющего разряда. // *Журнал радиоэлектроники.* – 2025. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.11.6>

00000000000