

04;12

©1992 г.

РЕЖИМЫ ЗАПУСКА ПСЕВДОИСКРОВОГО РАЗРЯДНИКА СО ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМ ТЛЕЮЩИМ РАЗРЯДОМ В УЗЛЕ ПОДЖИГА

К.А.Клименко, Ю.Д.Королев, В.Г.Работкин, О.Б.Франц, И.А.Шемякин

Исследуется влияние режимов горения вспомогательного тлеющего разряда в узле поджига псевдоискрового разрядника на времена задержки срабатывания. Найдены условия, при которых имеют место малое время задержки и слабая зависимость этого времени от давления. Обсуждаются особенности, связанные с влиянием величины пускового напряжения на срабатывание разрядника.

В последнее время наблюдается повышенный интерес к исследованию нового типа коммутирующих приборов на основе разряда низкого давления с холодным катодом, часто называемых псевдоискровыми разрядниками [1–3]. Их рассматривают как альтернативу водородным тиратронам в устройствах, где требуются высокая крутизна фронта импульса коммутируемого тока и наносекундная стабильность срабатывания. Электродная система разрядника представляет собой две полости, сообщающиеся через отверстие на оси. Исследование различных способов запуска показало перспективность создания разрядников со вспомогательным стационарным тлеющим разрядом в узле поджига [2]. Ясно, что условия горения вспомогательного разряда, а также особенности конструктивного выполнения узла поджига влияют на процесс зажигания разряда в основном промежутке. Влияние этих факторов изучается в настоящей работе.

Упрощенная конструкция разрядника и электрическая схема питания показаны на рис. 1. Корпус разрядной камеры 1 представлял собой цилиндр из керамики внутренним диаметром 86 мм с фланцами, на которых крепились электроды (анод 2 и катод 3) основного промежутка. Форма электродов выбрана так, чтобы обеспечить максимальное пробивное напряжение в области левой ветви кривой Пашена, а также предотвратить запаление поверхности керамики парами материала электродов. Длина зазора в основном промежутке составляла 4 мм и диаметры отверстий на оси электродов 2–4 также были 4 мм.

Устройство поджига представляло собой два полых электрода 4 и 5, между которыми зажигался стационарный тлеющий разряд. Балластное сопротивление $R_3 = 850$ кОм было существенно больше $R_4 = 1$ кОм, поэтому падение напряжения на сопротивлении R_4 в процессе горения вспомогательного тлеющего разряда оказывалось пренебрежимо малым.

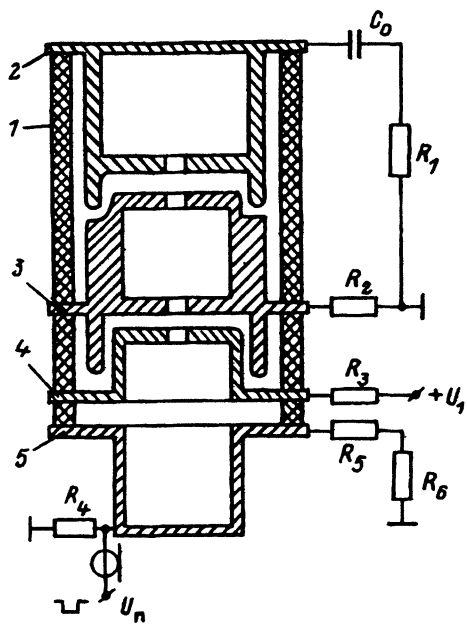


Рис. 1. Конструкция разрядника и электрическая схема питания.

Конструкция разрядника являлась разборной, что позволяло подбирать форму электродов 3–5, а также их взаимное расположение относительно друг друга. Основные эксперименты проведены при диаметре катодной полости электрода 3, равной 20 мм, и высоте полости 15 мм. Диаметр полостей электродов 4 и 5 вспомогательного тлеющего разряда составлял 26 мм, а расстояние от дна катодной полости до дна анодной — 80 мм. В качестве рабочих газов в приборе применялись азот и воздух. Давление регулировалось в пределах $10^{-2} - 10^{-3}$ Тор за счет изменения соотношения между скоростью откачки и натекания газа.

Цепь питания основного промежутка включала емкость $C_0 = 47$ нФ, заряжаемую напряжением $U_0 = 5 - 20$ кВ, сопротивление нагрузки $R_1 = 1.5$ Ом и низкоомный шунт R_2 для осциллографической регистрации тока разряда. Волновое сопротивление цепи разряда $\rho = 2$ Ом, что несколько выше сопротивления нагрузки, и характер тока был колебательным.

Для запуска прибора необходимо обеспечить проникновение электронов из плазмы вспомогательного разряда в катодную полость электрода 3 через нижнее отверстие. В свою очередь электроны под действием потенциала U_0 могут проникать в основной зазор. Хотя длина свободного пробега электронов для реакции ионизации больше размеров полости катода 3, часть электронов производит ионизацию и в полости накапливается объемный заряд положительных ионов. В результате начинает играть роль эффект полого катода, ионизация в полости усиливается, что способствует увеличению потока электронов в основной зазор. В конечном счете это вызывает пробой основного промежутка в соответствии с механизмом, описанным в [4,5].

В исходном состоянии горение вспомогательного тлеющего разряда практически не влияет на пробивное напряжение разрядника, так как электроны не проникают в полость катода 3. Потенциал электрода 4,

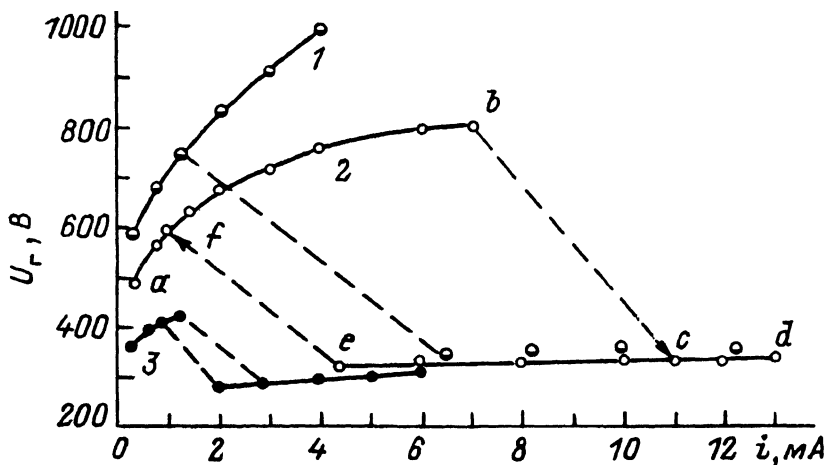


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика тлеющего разряда в узле поджига при разных давлениях азота.

1 — $4 \cdot 10^{-2}$, 2 — $5 \cdot 10^{-2}$, 3 — $7 \cdot 10^{-2}$ Тор.

равный напряжению горения тлеющего разряда, положителен, и электрическое поле в зазоре между электродами 3 и 4 является тормозящим. При подаче пускового импульса U_n на сопротивление R_4 электрод 5 оказывается под отрицательным потенциалом относительно электрода 3 и электроны могут проникать в полость 3. Пусковой импульс имел амплитуду до 10 кВ, длительность фронта не хуже 30 нс, а накопительная емкость в цепи поджига, разряжающаяся на сопротивление R_4 , составляла 3,3 нФ.

На рис. 2 показаны вольт-амперные характеристики вспомогательного тлеющего разряда в азоте при разных давлениях. Рассмотрим особенности горения разряда на примере кривой для $p = 5 \cdot 10^{-2}$ Тор. При малых токах вольт-амперная характеристика является растущей (участок ab). По сравнению с характеристикой классического аномального тлеющего разряда в плоскопараллельной системе электродов данная кривая идет ниже, так как имеет место эффект полого катода [6]. В примененной конструкции длина катодного слоя соизмерима с поперечным размером катодной полости. Участок ab характеризуется тем, что в разряде не наблюдается области, соответствующей отрицательному свечению, а сам разряд можно назвать затрудненным тлеющим разрядом с полым катодом.

При увеличении напряжения U_1 и достижении точки b происходит скачкообразное увеличение тока и переход на участок cd вольт-амперной характеристики. Здесь вблизи оси полого катода яркость свечения увеличивается и эту область можно интерпретировать как аналог отрицательного свечения. Соответственно напряжению горения при наличии отрицательного свечения уменьшается. Режим разряда на участке cd можно назвать аномальным тлеющим разрядом с полым катодом. Описанный эффект изменения свечения разряда при переходе из одного режима в другой хорошо наблюдался при использовании конструкции, в которой

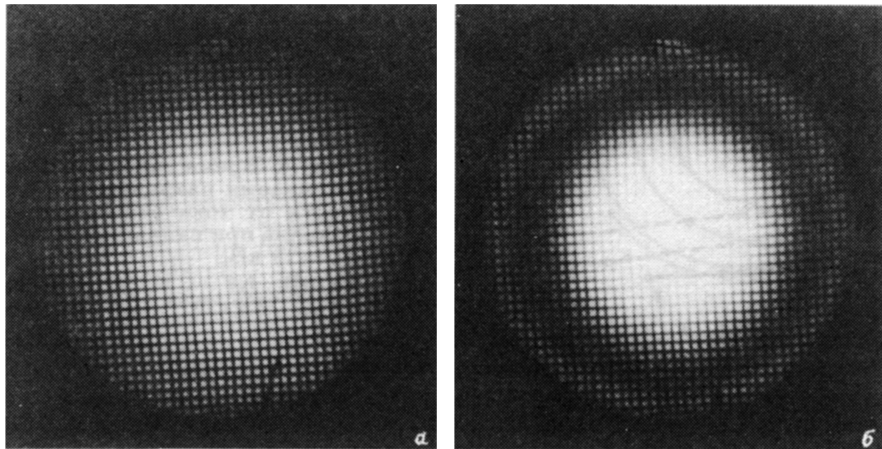


Рис. 3. Фотографии свечения затрудненного (а) и аномального (б) тлеющих разрядов в узле поджига.

торец электрода 5 представлял мелкаячеистую сетку. Соответствующие фотографии разряда через сетку представлены на рис. 3.

Если рабочая точка вольт-амперной характеристики находится в области аномального разряда, то при уменьшении тока за счет уменьшения напряжения U_1 обратный переход в затрудненный режим происходит не из точки c , а из точки e по пунктирной кривой ef . Таким образом, имеет место гистерезис вольт-амперной характеристики.

Перевод вспомогательного разряда из одного режима горения в другой осуществляется также при подаче пускового импульса на сопротивление R_4 . Рассмотрим особенности этого процесса. Поскольку сопротивление тлеющего разряда достаточно велико и соизмеримо с R_3 , то в первый момент времени распределение пускового напряжения по электродам определяется паразитными емкостями $C_1 = 8$ пФ между электродами 5 и 4 и $C_2 = 17$ пФ между электродами 4 и 3. Соответственно потенциал электрода 4 относительно "земли"

$$U_4 = U_r - U_n \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad (1)$$

а падение напряжения на тлеющем разряде

$$U_p = U_r + U_n \frac{C_2}{C_1 + C_2}, \quad (2)$$

где U_r — напряжение горения тлеющего разряда до подачи пускового импульса U_n .

Переходный процесс определяется разрядкой емкости C_1 через сопротивление плазмы тлеющего разряда, которое в свою очередь уменьшается во времени за счет ударной ионизации в газе. Если исходный режим горения тлеющего разряда соответствует участку fb , то после окончания пускового импульса устанавливается стационарный режим горения, соответствующий участку ec . Если же вначале разряд горел на участке af

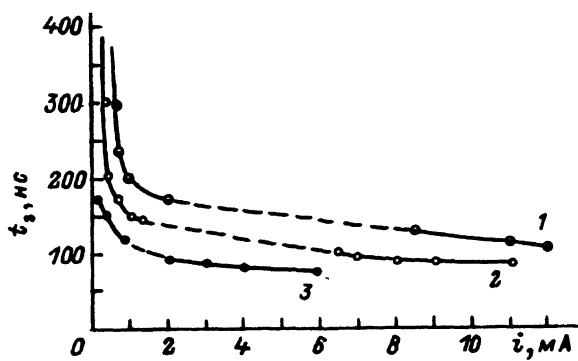


Рис. 4. Время запаздывания срабатывания разрядника в зависимости от тока вспомогательного разряда при напряжении поджига $U_n = 10$ кВ.

U_0 , кВ: 1, 2 — 15; 3 — 5; p , Тор: 1 — $3.6 \cdot 10^{-2}$, 2 — $4 \cdot 10^{-2}$, 3 — $7 \cdot 10^{-2}$.

вольт-амперной характеристики, то после окончания импульса поджига устанавливается исходное состояние разряда.

Отметим также интересный факт, что перевод разряда из затрудненного режима горения в аномальный режим может быть осуществлен с участка fb при статическом пробое основного промежутка. Причина здесь, по-видимому, в том, что в процессе зажигания разряда в основном промежутке на оси разрядника формируется ионный пучок малого диаметра [1,5], который проникает в полость узла поджига и инициирует смену режима горения разряда в полости.

Условия горения вспомогательного разряда влияют на времена запаздывания срабатывания разрядника относительно момента прихода импульса поджига. Наиболее резко это проявлялось при неоптимизированных размерах катодной полости электродов 3 — 5. Например, проводились эксперименты при диаметре полости электрода 3, равном 8 см, и глубине полости 8.5 см. Геометрия узла поджига была близкой к описанной выше. Здесь для рабочего напряжения $U_0 = 15$ кВ, давления газа $p = 5 \times 10^{-2}$ Тор и амплитуде импульса поджига $U_n = 10$ кВ в режиме горения затрудненного разряда время запаздывания t_3 составляло около 800 нс, а при переходе к аномальному режиму оно резко уменьшалось до 150 нс.

В описываемой здесь конструкции подобный переход происходит более плавно. Результаты измерения времен t_3 в зависимости от тока вспомогательного разряда показаны на рис. 4. При увеличении тока в цепи поджига время запаздывания уменьшается. После достижения тока, соответствующего точке f на рис. 2, в узле поджига зажигается аномальный разряд. Переходная область показана пунктиром на кривых рис. 4. Как в первом, так и во втором режимах горения вспомогательного разряда возможно получение малых времен $t_3 < 200$ нс и стабильности срабатывания не хуже ± 5 нс. Однако в первом случае диапазон токов, обеспечивающих малые t_3 , довольно узкий. Увеличение тока ведет к зажиганию аномального разряда, а уменьшение — к резкому росту t_3 . Кроме того, время запаздывания здесь сильно зависит от давления газа.

Легко видеть, что уменьшение давления вызывает перемещение рабочей точки на новую кривую $t_3(i)$ влево и вверх по плоскости рис. 4. Например, если при $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Тор и токе $i = 0.8$ мА имеем $t_3 = 180$ нс, то для $p = 3.6 \cdot 10^{-2}$ Тор время запаздывания становится более 250 нс.

Таким образом, в режиме затрудненного разряда в узле поджига необходимо особое внимание уделять стабилизации давления в разряднике.

Рис. 5. Время запаздывания срабатывания разрядника в зависимости от напряжения поджига при рабочем напряжении $U_0 = 15$ кВ.

1-3 — для затрудненного разряда при токе $i = 0.8$ мА; 4, 5 — для аномального разряда при $i = 7$ мА; p , Тор: 1 — $3.6 \cdot 10^{-2}$, 2 — $4 \cdot 10^{-2}$, 3 — $5 \cdot 10^{-2}$, 4 — $4 \cdot 10^{-2}$, 5 — $5 \cdot 10^{-2}$.

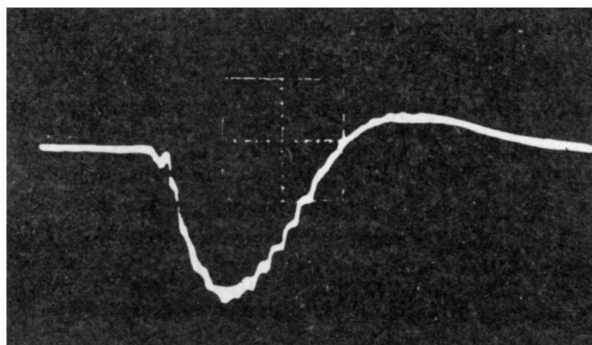
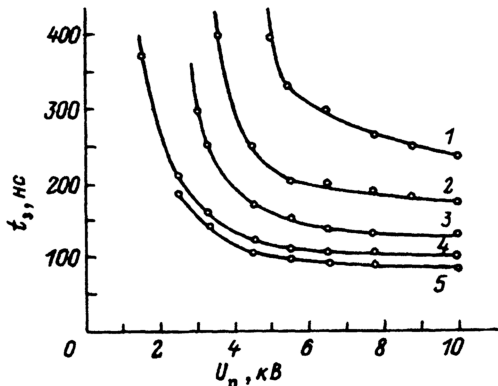


Рис. 6. Осциллограмма коммутируемого тока разряда. Амплитуда тока 5.7 мА, развертка 100 нс/дел.

Исключение зажигания аномального разряда достигается за счет уменьшения глубины катодной полости. Именно в таких условиях работал разрядник, описанный в [6].

Из вольт-амперных характеристик (рис. 2) видно, что при аномальном разряде ток практически не зависит от давления газа, что представляет собой один из факторов, обуславливающих и слабую зависимость t_3 от давления. Однако ток вспомогательного разряда здесь должен быть около 10 мА и более, чтобы обеспечить аномальный разряд во всем диапазоне рабочих давлений $3-5 \cdot 10^{-2}$ Тор. Малые времена запаздывания и слабая зависимость $t_3(p)$ благоприятствуют использованию этого режима для параллельной работы нескольких разрядников на общую нагрузку.

На рис. 5 показана зависимость t_3 от пускового напряжения. Начиная с некоторых малых напряжений U_n время запаздывания резко возрастает. Как отмечалось, пусковое напряжение распределяется по электродам узла поджига в соответствии с емкостями C_1 и C_2 так, что потенциал электрода 4 определяется из (1). Видно, что U_4 может быть как положительным, так и отрицательным. Во втором случае электроны в промежутке между электродами 3 и 4 ускоряются, а сам промежуток можно назвать по аналогии с терминологией, принятой для плазменных источников электронов, извлекающим промежуток. Имеется в виду, что электроны под действием потенциала U_4 извлекаются из анодной поло-

сти вспомогательного разряда. Для такого режима характерны малые времена t_3 и слабое влияние напряжения поджига на t_3 . Так как при аномальном тлеющем разряде напряжение горения ниже, чем при затрудненном, то диапазон пусковых напряжений, обеспечивающих малые t_3 , при аномальном разряде расширяется. Дополнительно этот диапазон можно расширить, подключая параллельно емкости C_1 дополнительную емкость [6].

Описанный разрядник испытывался нами при работе с частотой следования импульсов 50 с^{-1} . Типичный режим работы соответствовал напряжению $U_0 = 20 \text{ кВ}$, напряжению $U_n = 7 \text{ кВ}$, току вспомогательного разряда $i = 0.8 \text{ мА}$, давлению газа $p = 5 \cdot 10^{-2} \text{ Тор}$. Осциллограмма тока разряда с наложением 10 последовательных импульсов показана на рис. 6. Видно, что имеет место высокая стабильность срабатывания и повторяемость импульсов. Максимальная продолжительность непрерывной работы при описываемых испытаниях составляла 1.5 ч, причем в течение этого времени не наблюдалось медленного дрейфа времени t_3 . В дальнейшем планируется провести ресурсные испытания на нескольких приборах, изготовленных в металлокерамическом исполнении.

Авторы выражают признательность В.А.Лавриновичу за изготовление металлокерамических камер для данных экспериментов.

Список литературы

- [1] Frank K., Christiansen J. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1989. Vol. 17. N 5. P. 748-753.
- [2] Kozlik C., Frank K., Almen O. et al. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 1989. Vol. 17. N 5. P. 758-761.
- [3] Bauer H.R., Gundersen M.A. // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol. 57. N 5. P. 434-436.
- [4] Коваль Н.Н., Королев Ю.Д., Пономарев В.Б. и др. // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 6. С. 747-752.
- [5] Клименко К.А., Королев Ю.Д. // Тез. докл. V Всесоюз.конф. по физике газового разряда. Кн. 2. Омск, 1990. С. 43-44.
- [6] Klimentko K.A., Kolesnikov A.V., Korolev Yu.D. et al. // Proc. XX Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Pisa, 1990. P. 492-493.

Институт сильноточной электроники
Томск

Поступило в Редакцию
17 июля 1991 г.