

Влияние частоты импульсов на инициирование и функционирование среднечастотного импульсного разряда атмосферного давления в потоке аргона

К.П. Савкин^{1,}, Е.М. Окс^{1,2}, Г.Ю. Юшков¹, А.С. Бугаев¹, А.Г. Николаев¹, М.В. Шандриков¹*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

²*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*

**savkin@opee.hcei.tsc.ru*

Аннотация. В настоящей работе исследован слаботочный разряд (до 1 А) атмосферного давления в режиме импульсного электропитания с частотой от 20 до 100 кГц в потоке аргона с расходом до 3 л/с. Увеличение частоты следования импульсов приводит к снижению напряжения инициирования разряда почти в 2.5 раза, и уменьшению времени фронта тока разряда почти в 2 раза. Данный экспериментальный факт обусловлен возрастанием концентрации возбужденных атомов рабочего газа аргона, смешанных с возбужденными молекулами воздуха в промежутках между импульсами на фоне снижения тока разряда.

Ключевые слова: газовый разряд, атмосферное давление, импульсный режим, инициирование разряда.

1. Введение

Фундаментальный исследовательский и практический интерес к разрядам атмосферного давления обусловлен растущими потребностями применения плазменных технологий несвязанных с применением вакуумных систем. Особенности функционирования разрядов определяются природой эмиссии электронов с рабочей поверхности катода, напряжением горения, током, структурой положительного столба. В зависимости от этих параметров обеспечиваются режимы генерации плазмы – низкотемпературной неравновесной [1] или высокотемпературной равновесной [2]. Широко применяются генераторы неравновесной плазмы атмосферного давления для решения задач в области модификации поверхности материалов [3], синтеза [4] и разрушения химических соединений [5], подавления болезнетворных микроорганизмов [6]. Особенностью разрядов атмосферного давления является преимущественно контрагированная форма токового канала в установившемся режиме функционирования [7]. Слаботочная форма горения таких разрядов обеспечивает стабильность генерации плазмы в условиях контролируемых эрозионных процессов на поверхности электродов разрядных систем [8]. Импульсное электропитание разряда атмосферного давления – эффективный метод управления параметрами разряда. С одной стороны, амплитудой импульса короткой длительности достаточно сложно обеспечить напряжение и ток разряда на уровне пороговых значений, ниже которых разряд погасает или не может стабильно функционировать. С другой стороны, регулировкой длительности и частоты следования импульсов возможно осуществлять контроль тепловой нагрузки разрядной системы во избежание развития тепловой неустойчивости, приводящей к возмущению разряда [9]. В настоящей работе исследованы зависимости параметров среднечастотного (частота следования импульсов до 100 кГц) слаботочного (около 100 мА) разряда атмосферного давления в потоке аргона от частоты следования импульсов и конфигурации разрядного промежутка.

2. Постановка эксперимента

Для исследования разряда атмосферного давления в импульсной форме горения применялся экспериментальный макет, представленный на Рис.1. Генератор плазмы состоял из стержневого катода из тантала и коаксиального алюминиевого анода, выполнявшего, в том числе, функцию сопла. Дополнительный внешний анод был выполнен из медного прутка, закрепленного на изоляторе снаружи анодного сопла.

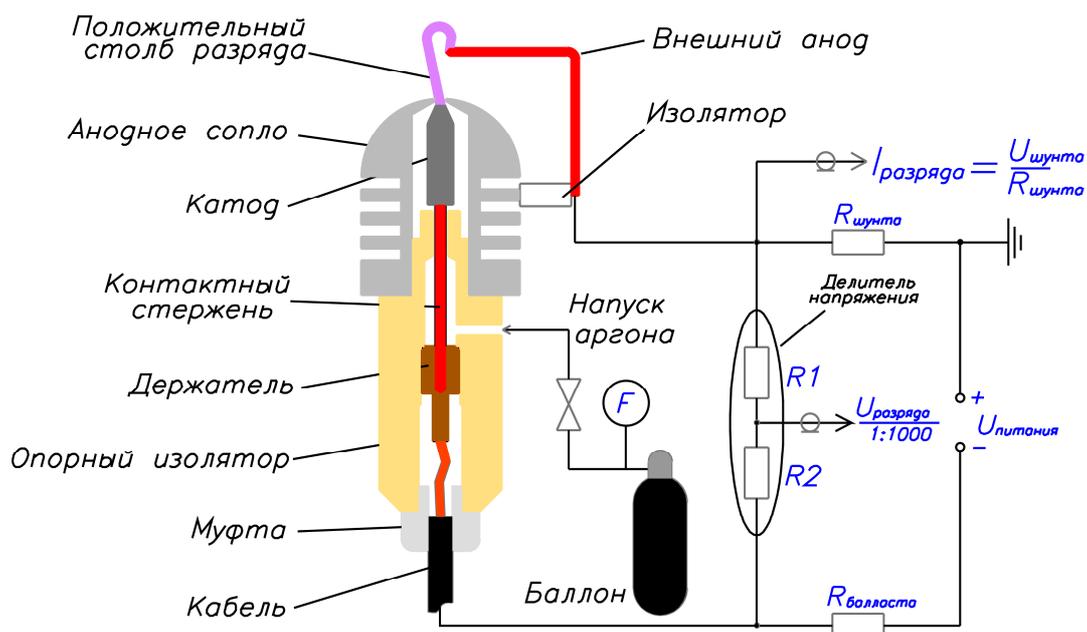


Рис.1. Экспериментальный макет для исследования параметров среднечастотного импульсного разряда атмосферного давления в потоке аргона.

Напуск рабочего газа – аргона происходил через отверстие в опорном изоляторе. Расход аргона контролировался при помощи натекателя с ручной регулировкой, оснащенного поплавковым ротаметром, и составлял 3 л/мин. Для электропитания разряда применялся генератор импульсного напряжения с возможностью регулировок амплитуды напряжения от 200 до 2000 В, частоты следования импульсов от 1 до 200 кГц и коэффициента заполнения периода от 10 до 70%. Ток разряда ограничивался балластным сопротивлением $R_{\text{балласта}} = 10$ кОм, включенным последовательно в цепь питания разряда между отрицательным выводом источника питания и катодом. Для измерения напряжения разряда применялся высоковольтный щуп Tektronix P6015A с коэффициентом деления 1:1000. Измерение тока разряда производилось при помощи шунта $R_{\text{шунта}} = 10$ кОм, включенного последовательно между анодом и заземленным положительным выводом источника питания. Регистрация импульсов тока и напряжения производилась при помощи запоминающего осциллографа Tektronix MDO 3024 с полосой пропускания 200 МГц. Процесс функционирования разряда атмосферного давления в потоке аргона происходил следующим образом. Между катодом и анодом генератора плазмы прикладывались импульсы напряжения. При достижении их амплитуды уровня 800 В происходил пробой разрядного промежутка. После пробоя разряд функционировал в самостоятельном режиме, при частоте следования разрядных импульсов от 20 до 100 кГц, и самостоятельное инициирование разряда происходило в начале каждого импульса. Плазма разряда принимала форму шнура, и, выдуваемая потоком аргона через выходную апертуру анодного сопла, изгибалась в виде петли. В случае применения внешнего анода, сопло находилось под плавающим потенциалом.

После нарастания напряжения до значения, при котором достигалось электрическое поле достаточное для пробоя, происходило его падение. За время этого падения происходил выброс тока разряда, после которого наступал режим установившегося тока. При этом напряжение уменьшалось до значений достаточных для горения разряда. Оставшаяся часть напряжения, обеспечиваемого источником питания, падала на балластном сопротивлении.

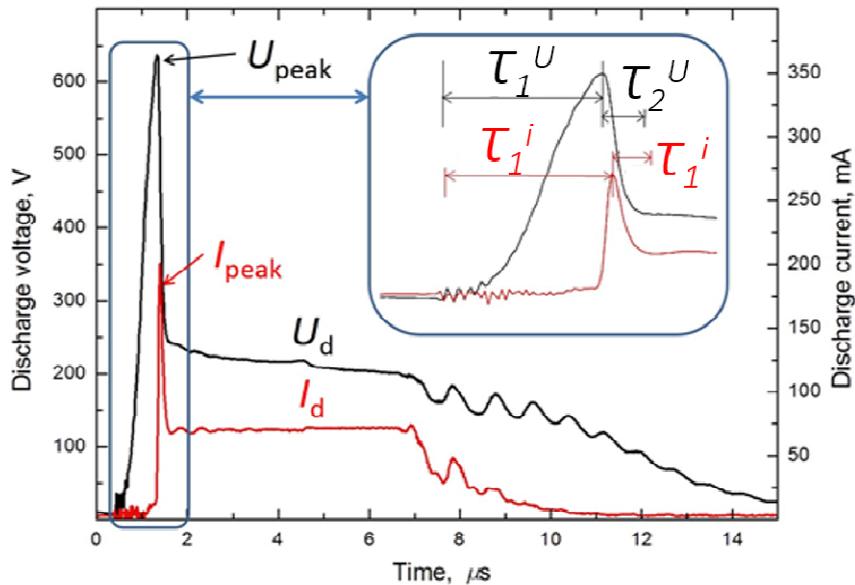


Рис.2. Осциллограммы напряжения и тока разряда, полученные при частоте следования импульсов тока разряда 60 кГц.

3. Результаты и их обсуждение

При исследовании зависимости основных параметров разряда от частоты следования импульсов длительность импульса разряда поддерживалась на уровне 7 мкс. При увеличении частоты наблюдалось уменьшение амплитуды зажигания разряда в начале каждого импульса от 800 В, при частоте 20 кГц, до 350 В, при частоте 100 кГц. Амплитуда выброса тока разряда также претерпевала уменьшение с 360 мА, при 20 кГц, до 80 мА, при частоте 100 кГц. Временные характеристики импульсов напряжения и тока разряда зависели от частоты следования импульсов. С увеличением частоты уменьшалась длительность фронта импульса напряжения τ_1^U , и также сокращалась задержка между включением импульса напряжения и момента времени τ_1^i , когда ток достигал пикового значения. В свою очередь, увеличивались длительности спада напряжения после инициирования разряда τ_2^U и времени спада тока разряда τ_2^i (Рис.2 и 3).

В результате анализа зависимостей, представленных на Рис.3, очевидно, что увеличение частоты следования разрядных импульсов оказывает наибольший эффект на время нарастания тока разряда. Задержка момента достижения токовым пиком максимального значения уменьшается с 1.75 мкс при частоте 20 кГц, до 0.9 мкс при 100 кГц.

Применение внешнего анода обусловлено возможностью управления протяженностью положительного столба разряда атмосферного давления. Вместе с этим, данная конструктивная особенность также приводила к уменьшению времени нарастания пика на переднем фронте импульса тока (Рис.4). При частоте 40 кГц задержка момента достижения токовым пиком максимального значения составляла 1.25 мкс против 1.6 мкс, а при частоте 100 кГц – 0.7 мкс против 0.9 мкс, когда анодом являлось сопло.

Отдельного внимания заслуживает сравнение зависимостей тока разряда от напряжения его горения в установившемся режиме с применением сопла в качестве анода с режимом, когда сопло было промежуточным электродом под плавающим потенциалом. При одном и том же напряжении на выходе источника питания, измеряемом до балластного сопротивления, при частоте импульсов 40 кГц, в случае применения внешнего анода, напряжение разряда увеличивалось (Рис.5), а именно значения U_d перемещались в диапазон от 240 до 270 В, по сравнению с тем, когда сопло являлось анодом ($U_d = 210\text{--}240$ В).

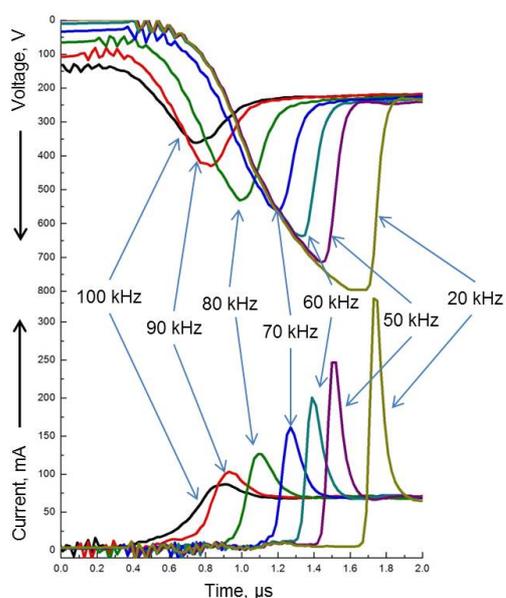


Рис.3. Осциллограммы пиковых амплитуд напряжения и тока, полученных в момент инициирования импульса тока разряда, с применением сопла в качестве анода.

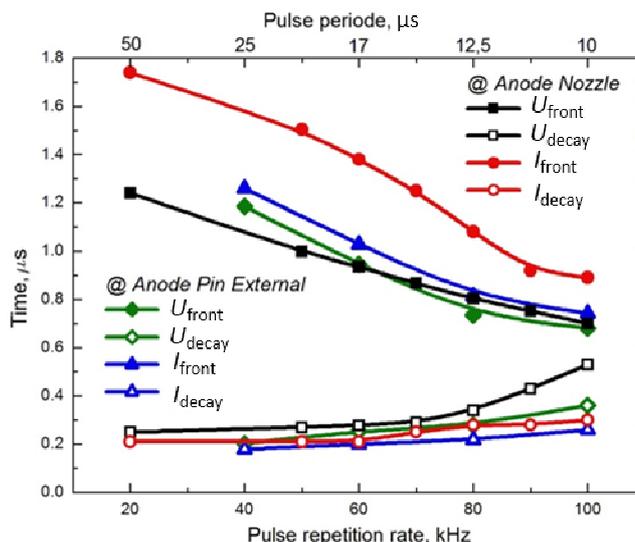


Рис.4. Зависимости времени длительности пиковых частей импульсов напряжения (передний фронт и спад) и тока разряда (длительность задержки инициирования и спад).

Очевидно, что увеличение протяженности токового канала разряда эквивалентно увеличению сопротивления разрядного промежутка. В результате, при близких значениях тока разряда, падение напряжения между катодом и анодом возрастает при увеличении расстояния между катодом и анодом. Повышение частоты следования импульсов с 40 кГц до 100 кГц изменяет поведение зависимостей тока разряда от напряжения горения в случае применения внешнего анода (Рис.6).

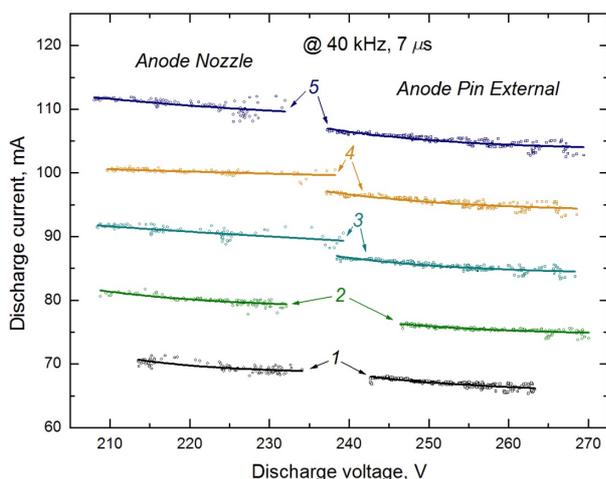


Рис.5. Зависимости тока разряда от напряжения горения, при частоте импульсов 40 кГц (пары кривых 1–5 соответствуют одинаковому напряжению питания, измеряемому на выходе источника напряжения).

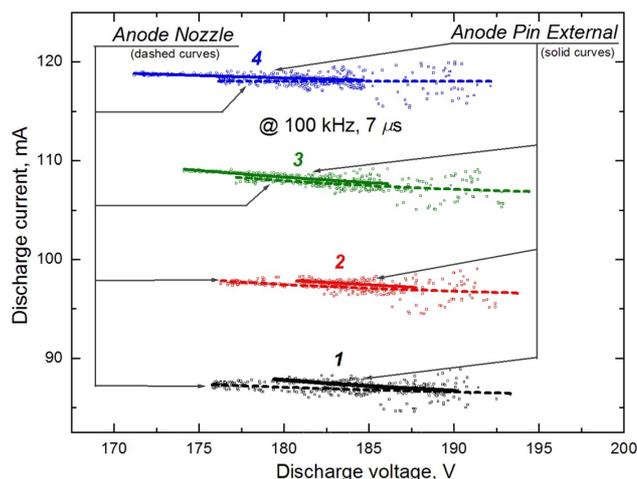


Рис.6. Зависимости тока разряда от напряжения горения, при частоте импульсов 100 кГц (пары кривых 1–4 соответствуют одинаковому напряжению питания, измеряемому на выходе источника напряжения).

При одном и том же напряжении на выходе источника питания, измеряем до балластного сопротивления, зависимости тока от напряжения, полученные в режимах с

анодным соплом и с внешним анодом, в диапазоне напряжений от 180 до 190 В, совпадают. Таким образом, можно заключить о возможности расширения диапазона напряжения горения разряда атмосферного давления в результате применения внешнего анода. Также следует отметить, что при функционировании разряда с частотой 100 кГц отсутствует «ступенчатое» уменьшение тока разряда при переходе в режим с внешним анодом, как это наблюдалось при частоте следования импульсов 40 кГц (Рис.5).

Уменьшение напряжения зажигания и сокращение времени нарастания тока разряда на фронте импульсов с увеличением частоты их следования дают возможность рассуждать о существовании плазмообразующей среды в промежутках между импульсами разряда. Действительно, в работах [10–12] показано, что в газовых разрядах при пониженном и атмосферном давлениях, после спада разрядного тока наблюдается, так называемое, послесвечение, обусловленное релаксацией возбуждённых молекул азота N_2 (C^3P_u – V^3P_g), гидроксильного радикала OH ($A^2\Sigma$ – $X^2\Pi$) и атомов аргона Ar ($4p$ – $4s$). Характерное время жизни послесвечения может достигать нескольких десятков микросекунд. Ранее нами было показано [13], что в результате горения разряда в потоке аргона, направленного в воздух при нормальном атмосферном давлении, максимум интенсивности оптического излучения достигался именно при затухающем токе, когда энергия, выделяющаяся в результате рекомбинации ионов, расходуется на возбуждение нейтральных молекул газовой смеси. Сокращение временного промежутка между разрядными импульсами до времени меньшего, чем длительность послесвечения приводит к тому, что при включении очередного импульса напряжения, между электродами разрядной системы ещё присутствует активная среда, способствующая ступенчатому возбуждению и последующей ионизации атомов аргона из основных метастабильных состояний [14], в совокупности с генерацией вторичных электронов в результате взаимодействия возбужденных молекул газа с поверхностью катода [15].

4. Заключение

Исследованы особенности инициирования и горения слаботокового разряда (уровня 100 мА) в потоке аргона, направленного в окружающий воздух при атмосферном давлении в зависимости от частоты следования импульсов напряжения, прикладываемого к разрядному промежутку, при постоянной длительности импульса. Показано, что увеличение частоты от 20 до 100 кГц, при длительности импульса 7 мкс, приводит к снижению напряжения инициирования разряда с 800 В до 350 В, а также уменьшению амплитуды выброса тока в момент инициирования разряда с 350 мА до 90 мА. Увеличение частоты импульсов также оказывает влияние на временные параметры фронтов импульсов тока и напряжения, а именно, сокращается длительность нарастания напряжения, и уменьшается задержка между моментом инициирования разряда и достижением тока максимального значения в импульсе. Применение внешнего анода и сопла, находящегося под плавающим потенциалом, приводит к увеличению протяженности положительного столба разряда, и, как следствие, к увеличению напряжения горения на величину около 20 В, при частоте следования импульсов 20–40 кГц. С увеличением частоты импульсов, начиная со 100 кГц, данный эффект пропадает. Представленные экспериментальные результаты определяются влиянием остаточной смеси возбужденных газовых молекул, образующих послесвечение. Увеличение частоты следования импульсов разряда сокращает временной промежуток между разрядными импульсами. При длительности этого промежутка меньшей времени послесвечения, инициирование разряда происходит в среде возбужденных молекул, что приводит к более низкому напряжению инициирования и более быстрому нарастанию тока.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Томской области в рамках научного проекта № 19-48-700019.

5. Литература

- [1] Reuter S., Woedtke T. and Weltmann K-D., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **51**(23), 233001, 2018; doi: 10.1088/1361-6463/aab3ad
- [2] Heberlein J.V.R., *Pure Appl. Chem.*, **64**(5), 629, 1992; doi: 10.1351/pac199264050629
- [3] Antonella U., Fanelli F., *Processes*, **9**(11), 2069, 2021; doi: 10.3390/pr9112069
- [4] Chen H., Yuan D., Wu A., Lin X., Li X., *Waste Dispos. Sustain. Energy*, **3**, 201, 2021; doi: 10.1007/s42768-021-00074-z
- [5] Акишев Ю.С., *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, **62**(8), 26, 2019; doi: 10.6060/ivkkt.20196208.5908
- [6] Lotfy K., Khalil S.M., Abd El-Raheem H., *J. Theor. Appl. Phys.*, **14**, 37, 2020; doi: 10.1007/s40094-019-00362-4
- [7] Akishev Yu., Grushin M., Karalnik V., Petryakov A., and Trushkin N., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**(7), 075202, 2010; doi: 10.1088/0022-3727/43/7/075202
- [8] Nguyen-Smith R.T., Böddecker A., Schücke L., Bibinov N., Korolov I., Zhang Q.-Z., Mussenbrock T., Awakowicz P., and Schulze J., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **31**(3), 035008, 2022; doi: 10.1088/1361-6595/ac5452
- [9] Staack D., Farouk B., Gutsol A., and Fridman A., *J. Appl. Phys.*, **106**, 013303, 2009; doi: 10.1063/1.3143781
- [10] Xiong Q., Nikiforov A.Y., Lu X.P., and Leys C., *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **43**(41), 415201, 2010; doi: 10.1088/0022-3727/43/41/415201
- [11] Nikiforov A.Yu., Sarani A., and Leys Ch., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **20**(1), 015014, 2011; doi: 10.1088/0963-0252/20/1/015014
- [12] Stefanović I., Kuschel T., Schröter S., and Böke M., *J. Appl. Phys.*, **116**, 113302, 2014; doi: 10.1063/1.4895714
- [13] Savkin K.P., Oks E.M., Sorokin D.A., Yushkov A.Yu., Yushkov G.Yu., Sintsov S.V., and Vodopyanov A.V., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **31**(1), 015009, 2022; doi: 10.1088/1361-6595/ac309a
- [14] Ali Asgar M., Stone P.M., *Int. J. Mass Spectrom.*, **271**(1), 51, 2008; doi: 10.1016/j.ijms.2007.10.006
- [15] Смирнов Б.М., Терешонок Д.В., *ТВТ*, **52**(6), 809, 2014; doi: 10.7868/S0040364414060155