

Особенности функционирования и эмиссионные характеристики контрагированного дугового разряда, формирующего эмиссионную плазму в форвакуумном плазменном источнике импульсного электронного пучка

А.В. Казаков^{1,}, Е.М. Окс^{1,2}, Н.А. Панченко¹*

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

²Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

*andrykazakov@gmail.com

Аннотация. В форвакуумном плазменном источнике электронов на основе контрагированного дугового разряда использование промежуточного электрода с керамическим контрагирующим каналом обеспечивает увеличение максимального тока разряда и меньшее минимальное рабочее давление, при которых контрагированная дуга функционирует стабильно. При давлениях газа 5–6 Па форвакуумный источник на основе контрагированной дуги имеет классическую вольтамперную характеристику с достижением током эмиссии насыщения, однако при больших давлениях ток эмиссии монотонно растет по мере увеличения ускоряющего напряжения. Установлено, что при генерации низкоэнергетичного (до 8 кэВ) электронного пучка форвакуумным источником на основе контрагированной дуги рост давления газа обеспечивает увеличение радиуса электронного пучка. Наблюдаемое влияние давления обусловлено проникновением в разрядную систему источника ионного потока из области ускорения и транспортировки электронного пучка.

Keywords: контрагированный дуговой разряд, плазменный источник электронов, импульсный электронный пучок, форвакуумный диапазон давлений.

1. Введение

В плазменных источниках, генерирующих импульсные электронные пучки большого поперечного сечения при давлениях 10^{-3} – 10^{-1} Па, для формирования эмиссионной плазмы широко используется дуговой разряд с катодными пятнами [1–3]. Данный тип разряда используется и в форвакуумном плазменном источнике импульсного электронного пучка большого радиуса [4]. Для дугового разряда с катодными пятнами практически отсутствуют ограничения на амплитуду и длительность импульса разрядного тока [5], что обуславливает привлекательность его использования. Однако хаотичное перемещение катодных пятен оказывает негативное влияние на однородность и стабильность параметров эмиссионной плазмы, а также негативное влияние на параметры источника оказывают микро-капли и «осколки» (микрочастицы) материала катода, которые образуются в процессе функционирования катодных пятен. В плазменных источниках электронных пучков с целью уменьшения негативного влияния процессов, обусловленных функционированием катодных пятен, применяется контрагированный дуговой разряд [3, 6–8]. Контрагированный дуговой разряд реализуется сжатием положительного столба дугового разряда узким каналом в промежуточном электроде, расположенном между катодом и анодом, что обеспечивает экранирование катодной области дугового разряда от области формирования эмиссионной плазмы. В тоже время устойчивое функционирование контрагированной дуги ограничено максимальными током и длительностью импульса разряда. Превышение этих максимальных параметров приводит к погасанию разряда или возникновению катодного пятна на промежуточном электроде с последующим переходом в каскадный режим функционирования (две последовательно функционирующие дуги) [7].

Форвакуумные плазменные источники электронов, генерирующие электронные пучки в непрерывном и импульсном режимах при давлении до 100 Па и до 30 Па соответственно [4, 9], способны осуществлять непосредственную обработку непроводящих полимеров, керамик и стекол [10]. Это обеспечивается тем, что в рабочем диапазоне давлений

форвакуумных источников при генерации электронного пучка формируется плотная пучковая плазма, которая обеспечивает компенсацию отрицательного заряда, возникающего на поверхности диэлектриков при их обработке пучком электронов [10]. Широкое применение керамик, полимеров и стекол в промышленности и медицине способствует развитию способов и инструментов для их обработки. Это обуславливает актуальность задачи, связанной с улучшением параметров форвакуумных источников импульсного электронного пучка. Поэтому осуществляются исследования применения контрагированного дугового разряда в форвакуумном источнике импульсного электронного пучка. Как показано нами ранее [11], в форвакуумном плазменном источнике электронов, несмотря на отсутствие перепада давлений между катодной и анодной областями разрядного промежутка, влияние условий горения разряда на максимальные параметры контрагированной дуги схоже с традиционными источниками. Вместе с тем, при формировании плазмы в полном аноде (экспандере) и генерации электронного пучка наблюдаются особенности, обусловленные более высоким давлением газа в полном аноде и поступлением в разрядный промежуток обратного ионного потока из пучковой плазмы, формируемой в областях ускорения и транспортировки электронного пучка [11, 12]. Цель настоящей работы заключается в поиске способов увеличения предельных параметров контрагированной дуги и дальнейшем исследовании влияния процессов генерации электронного пучка на контрагированный дуговой разряд, используемый для генерации эмиссионной плазмы в форвакуумном плазменном источнике импульсного электронного пучка большого радиуса.

2. Схема экспериментальной установки и методика эксперимента

В экспериментах использовался форвакуумный плазменный источник импульсного электронного пучка большого радиуса на основе контрагированного дугового разряда. Описание данного источника представлено в [11]. Плазменный источник устанавливался на вакуумную камеру (Рис.1), давление в которой регулировалось скоростью подачи рабочего газа при неизменной скорости откачки механическим вакуумным насосом. Исходная конфигурация электродов разрядной системы источника, которая обеспечивает формирование эмиссионной плазмы, включает металлический (нержавеющая сталь) промежуточный электрод (ПЭ) с контрагирующим каналом (КК). В настоящей работе радиус и протяженность контрагирующего канала составляли 1.5 мм и 3 мм соответственно. Данный промежуточный электрод далее будем называть «ПЭ с металлическим КК». При использовании гелия в качестве рабочего газа ПЭ с металлическим КК не обеспечивает стабильное функционирование контрагированной дуги с длительностью импульса τ_d более 15–20 мкс, а максимальный ток I_{d-max} разряда при этом не превышает 4–5 А, что обусловлено в основном переходом разряда в каскадный режим. С целью повышения стабильности работы при использовании гелия и повышения максимальных параметров форвакуумного источника электронов при использовании других газов (азот, аргон) в настоящей работе использовался промежуточный электрод с керамическим контрагирующим каналом. Данный ПЭ состоит из керамического диска, в котором выполнен контрагирующий канал, и металлического опорного фланца, в котором выполнено углубление для размещения диска. В качестве материала диска использовалась алюмонитридная керамика, выбор которой обусловлен достаточно высокой температурой плавления и наибольшей теплопроводностью среди керамик. Радиус и протяженность КК в керамическом диске так же составляли 1.5 мм и 3 мм соответственно. Данную конфигурацию промежуточного электрода с керамическим контрагирующим каналом далее будем называть «ПЭ с керамическим КК». Для предотвращения попадания микро-капель и осколков материала катода (медь), которые при длительном функционировании могут привести к частичной металлизации поверхности

керамического КК, со стороны катодного узла на оси симметрии на расстоянии 2 см от входной апертуры КК был установлен плоский перераспределяющий электрод диаметром 4 мм. Перераспределяющий электрод был выполнен из нержавеющей стали и находился под плавающим потенциалом. Остальные конструктивные элементы плазменного источника остались без изменения.

Контрагированный дуговой разряд питался импульсным блоком питания разряда, который обеспечивает ток I_d разряда с амплитудой до 100 А. Длительность импульса τ_d в настоящей работе составляла 150 мкс при частоте следования импульсов $\nu = 1$ Гц. Высоковольтный источник постоянного напряжения обеспечивал ускоряющее напряжение U_a до 8 кВ. Ток контрагированного дугового разряда I_d , ток эмиссии I_e и ток электронного пучка I_b , который принимается цилиндром Фарадея, измерялись с помощью трансформаторов тока. Напряжение U_a на ускоряющем промежутке измерялось с помощью высоковольтного пробника TESTEC HVP-15HF. Распределения плотности тока j_e электронного пучка исследовались с помощью зонда, который представлял собой маленький цилиндр Фарадея (МЦФ), заключенный в защитный экран. МЦФ и защитный экран изготовлены из тантала. В защитном экране выполнено отверстие радиусом 2.5 мм, которое располагается на оси симметрии МЦФ. Керамический изолятор обеспечивал электрическую изоляцию МЦФ. Зонд размещался на системе перемещения. Ток в цепи заземления МЦФ измерялся с помощью трансформатора тока. Расстояние L от источника до зонда отсчитывалось от ускоряющего электрода (экстрактора), а радиальное расстояние r отсчитывалось от оси симметрии источника.

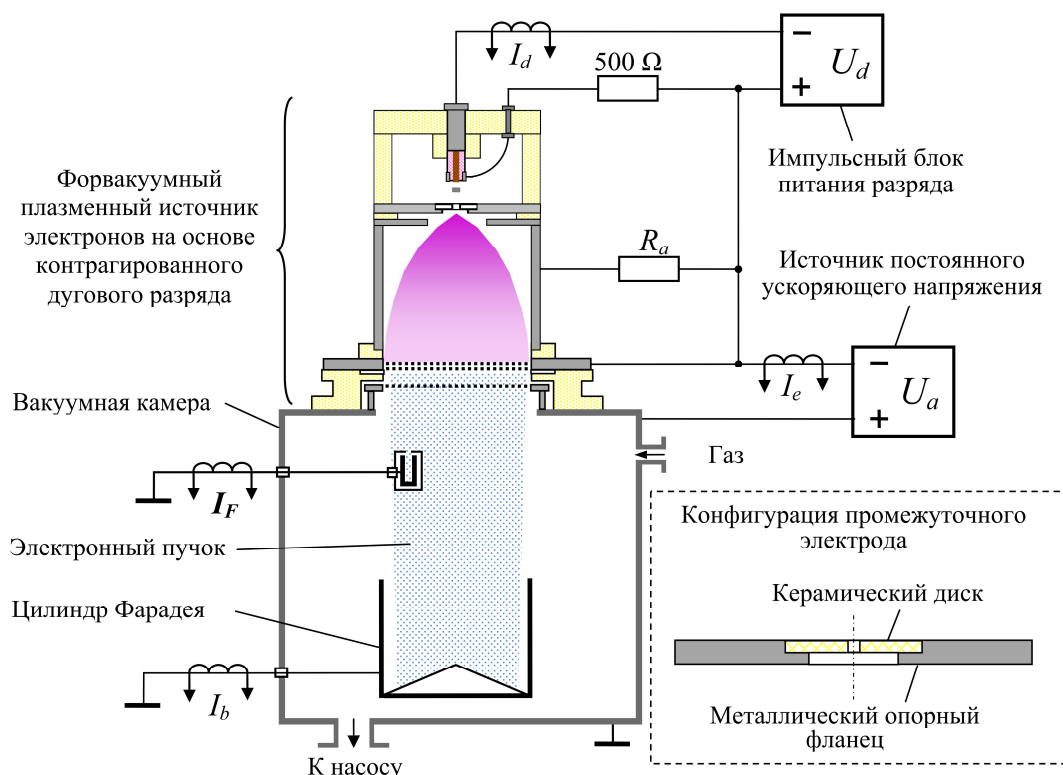


Рис.1. Схема экспериментальной установки.

3. Результаты экспериментов и их анализ.

При использовании в качестве рабочего газа гелия ПЭ с керамическим КК обеспечивает функционирование контрагированного дугового разряда с длительностью импульса 150 мкс,

но максимальный ток разряда I_{d-max} при такой длительности в исследованном диапазоне давлений 4–21 Па не превышает 10 А. I_{d-max} определялся как ток разряда, при котором вероятность стабильного функционирования контрагированного дугового разряда составляла 97%. Для азота и аргона ПЭ с керамическим КК обеспечивает увеличение максимального тока I_{d-max} по сравнению с ПЭ с металлическим КК во всем исследованном диапазоне давлений. При этом, например, для азота при $p > 13$ –14 Па по мере увеличения давления наблюдается более существенное увеличение I_{d-max} (Рис.2, кривая 2). Кроме того, использование ПЭ с керамическим КК расширяет диапазон рабочих давлений, обеспечивая меньшее минимальное давление p_{min} стабильного функционирования контрагированной дуги. В случае использования ПЭ с керамическим КК меньшие p_{min} и большие значения I_{d-max} обусловлены невозможностью инициирования катодного пятна на поверхности керамического КК, а также пористой структурой керамики, которая обеспечивает поступление дополнительного газа в контрагирующий канал, что обеспечивает компенсацию потерей газовых нейтралов, возникающей вследствие «электронной» откачки газа.

Как было установлено ранее [12], при генерации электронного пучка увеличение ускоряющего напряжения U_a обеспечивает рост величины максимального тока I_{d-max} контрагированной дуги. При использовании ПЭ с керамическим КК это влияние сохраняется, и I_{d-max} растет по мере увеличения напряжения U_a (Рис.3). Использование аргона обеспечивает большие значения максимального тока I_{d-max} как без эмиссии электронов ($U_a = 0$), так и в условиях генерации электронного пучка ($U_a > 0$) (Рис.3, кривая 3).

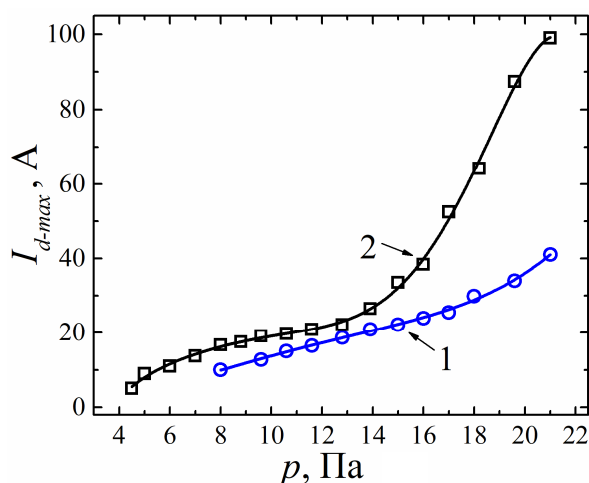


Рис.2. Максимальный ток I_{d-max} в зависимости от давления газа p , рабочий газ – азот, $U_a = 0$ кВ: 1 – ПЭ с металлическим КК; 2 – ПЭ с керамическим КК.

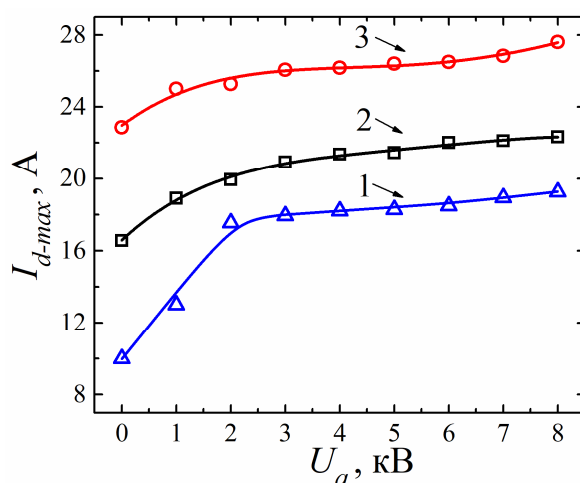


Рис.3. Зависимость максимального тока I_{d-max} контрагированной дуги от ускоряющего напряжения U_a ($p = 8$ Па): 1 – ПЭ с металлическим КК, газ – N_2 ; 2 – ПЭ с керамическим КК, газ – N_2 ; 3 – ПЭ с керамическим КК, газ – Ar.

Расширение диапазона рабочих давлений, обеспечиваемое при использовании ПЭ с керамическим КК, позволило исследовать эмиссионные характеристики контрагированного дугового разряда при меньших давлениях. Установлено, что при давлении $p = 5$ –6 Па зависимость тока I_e эмиссии и, соответственно, тока пучка I_b от ускоряющего напряжения U_a (ВАХ источника электронов) имеет классический вид с достижением тока насыщения (Рис.4). При большем давлении ($p > 5$ –6 Па), как и в работе [12], режим насыщения тока может не наблюдаться. Вместо этого при $U_a > 1$ кВ по мере увеличения напряжения U_a наблюдается заметный монотонный рост I_e и слабый рост разрядного тока (I_d). При этом, несмотря на рост тока разряда I_d , увеличивается эффективность эмиссии электронов $\eta = I_e/I_d$.

Наблюдаемый рост тока I_e обусловлен увеличением I_d , которое происходит в течение импульса из-за уменьшения напряжения горения дуги, как было установлено в [12], и перераспределением разрядного тока на дискообразный анод с эмиссионным электродом, что обеспечивает рост η . Данные процессы в форвакуумном источнике электронов, по-видимому, обусловлены поступлением в разрядный промежуток обратного ионного потока из пучковой плазмы. Это подтверждается тем, что при использовании газа с большим сечением ионизации (Ar), который обеспечивает большую плотность тока обратного ионного потока, наблюдается большая эффективность эмиссии η из плазмы контрагированного дугового разряда (Рис.4).

Давление газа оказывает существенное влияние на профиль распределения плотности тока j_e пучка. Влияние давления на профиль пучка так же наблюдалось для форвакуумного плазменного источника электронов на основе «обычного» дугового разряда с катодными пятнами, где увеличение давления способствовало сжатию электронного пучка (уменьшению его радиуса) [4]. Однако для форвакуумного источника на основе контрагированной дуги увеличение давления p приводит, наоборот, к заметному уширению электронного пучка, и влияние давления выражено сильнее (Рис.5). На Рис.5 также представлены времена развития фронта t_{f-e} плотности тока j_e , регистрируемого МЦФ в зависимости от радиальной координаты r . Вблизи оси симметрии пучка время t_{f-e} практически совпадает со временем фронта t_f тока эмиссии I_e . Увеличение давления приводит к сокращению данного времени. При этом радиальная координата, при которой время t_{f-e} близко ко времени t_f на оси симметрии пучка увеличивается по мере роста давления p (Рис.7). Без генерации пучка увеличение давления p приводит к уменьшению области формирования эмиссионной плазмы (т.е. уменьшению радиуса области генерации эмиссионной плазмы, где плотность составляла 50% от плотности на оси симметрии), что обусловлено уменьшением длины свободного пробега электронов в полом аноде [11]. При эмиссии электронов увеличение радиуса пучка и изменение зависимости $t_{f-e}(r)$, наблюдаемые по мере роста p , свидетельствуют о более эффективном формировании эмиссионной плазмы вблизи эмиссионного сеточного электрода. С учетом того, что плотность тока обратного ионного потока растет при увеличении p , то расширение области формирования эмиссионной плазмы, по-видимому, обеспечивается поступлением ионов из области ускорения и транспортировки пучка.

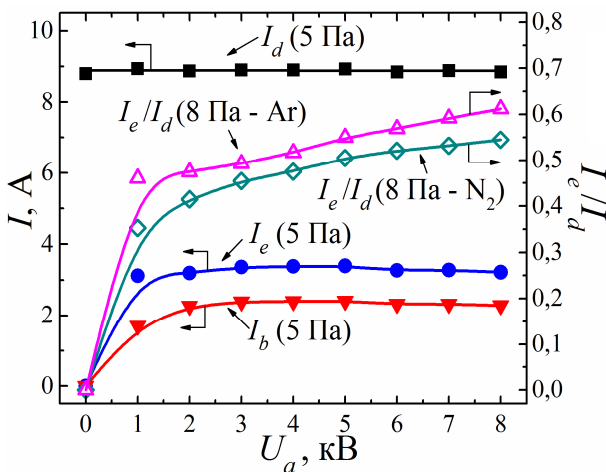


Рис.4. Зависимости токов I_d , I_e , I_b и эффективности эмиссии электронов I_e/I_d от ускоряющего напряжения U_a . Для графиков токов рабочий газ – азот.

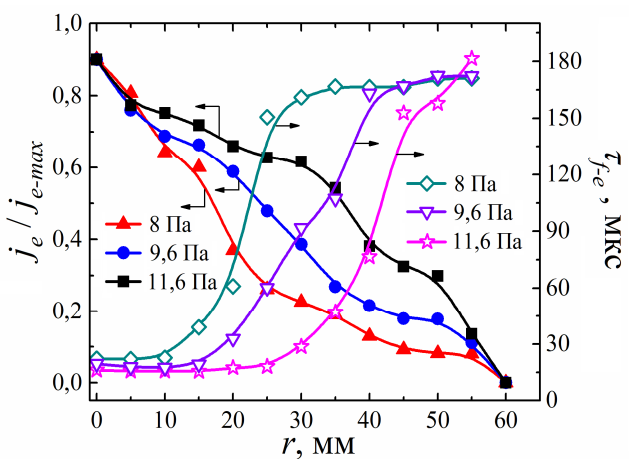


Рис.5. Радиальные распределения нормированной плотности тока j_e/j_{e-max} и времени t_{f-e} развития фронта тока, регистрируемого МЦФ; рабочий газ – азот, $L = 10$ см, $U_a = 8$ кВ.

4. Заключение

Использование промежуточного электрода с керамическим контрагирующим каналом обеспечивает увеличение максимального тока и меньшее минимальное рабочее давление контрагированного дугового разряда, функционирующего в разрядной системе форвакуумного плазменного источника импульсного электронного пучка. При давлениях газа 5–6 Па форвакуумный источник на основе контрагированной дуги имеет классическую вольтамперную характеристику с достижением током эмиссии насыщения, однако при больших давлениях ток эмиссии монотонно растет по мере увеличения ускоряющего напряжения. Для форвакуумного плазменного источника на основе контрагированной дуги увеличение давления газа приводит к большему радиусу электронного пучка, что существенно отличается от форвакуумного источника на основе «открытого» дугового разряда с катодными пятнами. Наблюдаемые зависимости обусловлены проникновением в разрядную систему источника ионного потока из области ускорения и транспортировки электронного пучка.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00123.

Список литературы

- [1] Koval N., Oks E.M., Schanin P.M., Kreindeland Yu.E., Gavrilov N.V., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, **321**(3), 417, 1992; doi: 10.1016/0168-9002(92)90049-A
- [2] Oks E., *Plasma Cathode Electron Sources: Physics Technology, Applications*. (Berlin: Wiley-VCH, 2006); doi: 10.1002/3527609415
- [3] Krasik Y.E., Dunaevsky A., Felsteiner J., *Phys. Plasmas*, **8**(5), 2466, 2001; doi: 10.1063/1.1345503
- [4] Kazakov A.V., Medovnik A.V., Oks E.M., Panchenko N.A., *Rev. Sci. Instrum.*, **91**, 093304, 2020; doi: 10.1063/5.0023172
- [5] Anders A., *Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation*. (New York: Springer, 2008).
- [6] Zlobina A.F., Kazmin G.S., Koval N.N., Kreindel B.E., *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **25**, 689, 1980.
- [7] Gavrilov N.V., Kreindel Y.E., Oks E.M., Schanin P.M., *Sov. Phys. Tech. Phys.*, **28**, 1947, 1983.
- [8] Devyatkov V.N., Koval N.N., *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.*, **83**, 1373, 2019; doi: 10.3103/S1062873819110091
- [9] Zenin A.A., Klimov A.S., Burdovitsin V.A., Oks E.M., *Tech. Phys. Lett.*, **39**(5), 454, 2013; doi: 10.1134/S1063785013050271
- [10] Burdovitsin A.V., Klimov A.S., Medovnik A.V., Oks E.M., *Plasma Sources Sci. Technol.*, **19**(5), 055003, 2010; doi: 10.1088/0963-0252/19/5/055003
- [11] Kazakov A.V., Medovnik A.V., Oks E.M., Panchenko N.A., *Vacuum*, **186**, 110071, 2021; doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110071
- [12] Kazakov A.V., Oks E.M., Panchenko N.A., *Vacuum*, **200**, 110990, 2022; doi: 10.1016/j.vacuum.2022.110990