

12

Сильноточный высоковольтный тлеющий разряд с электродуговым сеточным плазменным катодом

© Р.А. Картавцов¹, С.Ю. Дорошкевич¹, Д.А. Горьковская¹, М.С. Воробьев^{1,2},
А.А. Гришков¹, Н.Н. Коваль¹, М.А. Мокеев¹, П.В. Москвин¹

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

E-mail: maks_mok@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 августа 2025 г.

В окончательной редакции 5 сентября 2025 г.

Принято к публикации 8 сентября 2025 г.

Представлен новый способ генерации высоковольтного тлеющего разряда (ВТР), основанный на применении разрядной системы с электродуговым сеточным плазменным катодом и отличающийся самоподдержанием горения за счет испарения материала коллектора. Горение ВТР представляет собой сочетание двух различных механизмов протекания тока: дугового, связанного с испарением материала катода катодным пятном дугового разряда, и тлеющего, связанного с испарением материала анода ВТР (коллектора), ионизацией паров и ионно-электронной эмиссией с электродов сеточного плазменного катода.

Ключевые слова: высоковольтный тлеющий разряд, дуговой разряд, катодное пятно, сеточный плазменный катод, электронный пучок, анодная плазма, испарение материалов.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.02.62065.20471

В настоящее время одним из основных инструментов для нагрева и испарения мишени является электронный пучок (ЭП) [1,2]. Особое внимание привлекают электронно-пучковые установки, основанные на высоковольтном тлеющем разряде (ВТР) [3,4]. Такие установки обеспечивают возможность проведения различных технологических процессов: от модификации поверхности путем ее нагрева и расплава до испарения мишени в абляционном режиме [5–7]. К числу ключевых преимуществ подобных установок можно отнести простоту конструкции, длительный срок службы катода, отсутствие нагревательных элементов (а следовательно, и необходимость применения тугоплавких электродов и изоляторов), а также возможность работы при динамически изменяющемся остаточном давлении (вследствие плавления и испарения материала мишени) в рабочей камере за счет самосогласованного изменения характеристик разряда.

Несмотря на имеющиеся преимущества, электронные источники, основанные на ВТР с холодными катодами, обладают рядом ограничений, затрудняющих их широкое применение в технологических процессах. Максимальная плотность тока ограничивается переходом разряда в дуговую форму при достижении некоторого критического значения, зависящего от материала и состояния поверхности катода. Указанное ограничение обуславливает необходимость применения катодов большого диаметра при проектировании мощных электронных пушек, работающих на основе ВТР, что в свою очередь значительно усложняет конструкционную реализацию таких устройств и повышает требования

к тепловой и электрической устойчивости элементов системы.

В качестве альтернативы используются источники электронов с плазменными катодами (ПК), функционирующими на основе дугового разряда, которые позволяют достигать высокой плотности энергии ЭП [8,9]. Однако реализация таких систем требует наличия дополнительного источника питания, обеспечивающего устойчивое горение разряда в ПК в течение импульса тока ЭП. Указанный источник должен размещаться на высоковольтной стороне под потенциалом ПК, и его использование существенно усложняет схему электропитания установки. Кроме того, при работе в режиме высокой средней мощности ЭП значительно возрастают суммарные энергозатраты на эксплуатацию системы, что снижает ее энергетическую эффективность.

Целью настоящей работы является разработка источника электронов, основанного на ВТР, способного генерировать сильноточный (сотни ампер) ЭП субмиллисекундной длительности при электропитании от единственного источника высокого напряжения.

Для реализации этой идеи был выбран источник электронов „СОЛО“ с сеточным ПК на основе дуги низкого давления. Схема устройства и принцип его действия подробно описаны в работах [10,11]. Схема модернизированного источника электронов представлена на рис. 1 и отличается от приведенной в [10] электродной системой ПК и принципом его электропитания.

Существенной проблемой инициирования и горения ВТР является тот факт, что его устойчивое горение в самостоятельном режиме реализуется при давлениях выше 1 Па, что на один-два порядка превышает рабочее

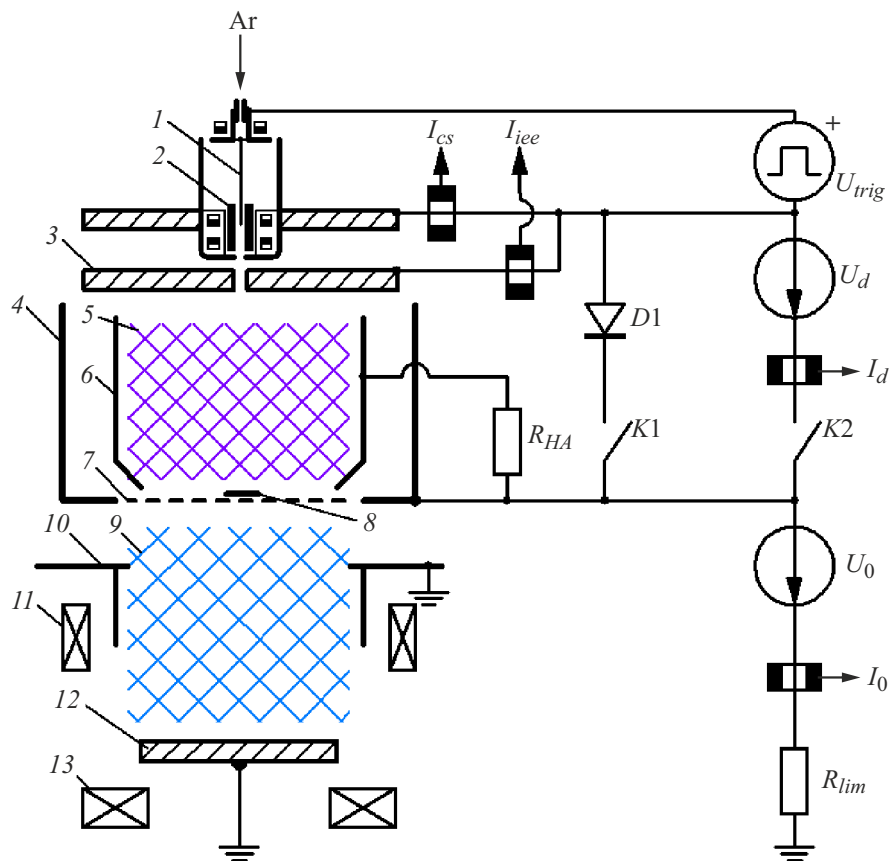


Рис. 1. Схема модернизированного источника электронов „СОЛО“. 1 — поджигающий электрод, 2 — магниевый катод дугового разряда, 3 — дополнительный катод, 4 — эмиссионный электрод, 5 — катодная/эмиссионная плазма, 6 — вставка, 7 — эмиссионная сетка, 8 — анодная вставка, 9 — анодная/пучковая плазма, 10 — извлекающий электрод, 11, 13 — соленоиды, 12 — коллектор.

давление, характерное для источника электронов типа „СОЛО“ [10]. Повышение давления до уровня 1 Па и выше оказывает негативное влияние на стабильность функционирования источника „СОЛО“ в традиционных режимах генерации ЭП. Тем не менее в рассматриваемом случае самоподдержание ВТР возможно лишь в том случае, когда к моменту прекращения тока дугового разряда давление рабочего газа в области дрейфа ЭП достигает величины, обеспечивающей необходимые параметры для стабильного протекания ВТР.

Другой ключевой проблемой в подобного рода источниках является прекращение эмиссии электронов из ПК после отключения питания дугового разряда U_d . В этих условиях ионно-электронной эмиссии с поверхности эмиссионной сетки 7 оказывается недостаточно для поддержания тока ВТР в ускоряющем промежутке, что приводит к его экспоненциальному спаду [12]. Основной причиной этого процесса является наличие в конструкции ПК электродов, находящихся под плавающим потенциалом в момент выключения тока дугового разряда и подвергающихся бомбардировке ускоренными ионами. Воздействие ионного потока вызывает изменение потенциала на указанных электродах, которое может

быть компенсировано исключительно за счет низкоэнергетических электронов катодной плазмы. В результате без принятия дополнительных мер эмиссия электронов из плазменного катода полностью прекращается.

Для устранения этого эффекта в схему электропитания источника введен так называемый „коротящий“ диод $D1$. При наличии питания дугового разряда ($I_d \neq 0$) данный элемент заперт и не оказывает влияния на функционирование ПК. Однако после отключения источника питания дугового разряда диод $D1$ обеспечивает эквипотенциальность катода и анода дугового разряда, создавая тем самым условия для формирования полого катода, что позволяет инициировать выход γ -электронов из ПК в ускоряющий промежуток, обеспечивая запуск и устойчивое протекание самоподдерживающегося сильного ВТР [13].

Самоподдержание ВТР в этом случае обеспечивается за счет испарения мишени, облучаемой пучком. В этом случае испарившийся материал ионизуется, и металлические ионы транспортируются к ПК сначала за счет диффузии в анодной плазме, а затем за счет захвата ускоряющим полем [14]. Эффект запускается при достижении порогового значения температуры мишени,

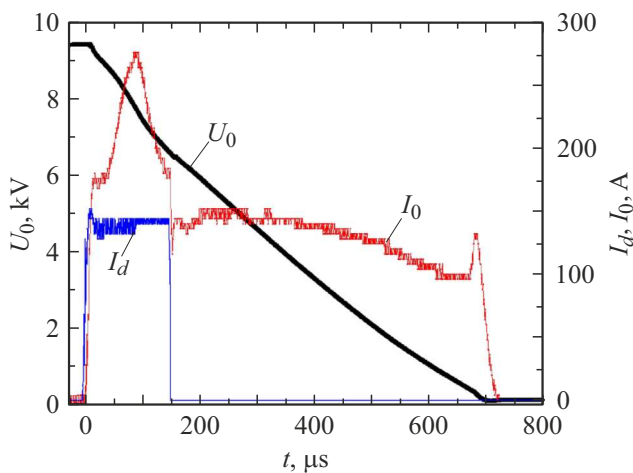


Рис. 2. Типичные осциллограммы инициирования и горения ВТР с электродуговым сеточным плазменным катодом: $p = 35 \text{ mPa}$, $U_0 = 9.5 \text{ kV}$, $I_d = 140 \text{ A}$.

когда в канале транспортировки создаются условия, требуемые для самосогласованного устойчивого горения ВТР.

На рис. 2 представлены осциллограммы тока дугового разряда, тока в ускоряющем промежутке и ускоряющего напряжения для модернизированного электронного источника. Эксперимент проводился с использованием коллектора I_2 , изготовленного из нержавеющей стали. Начальное давление рабочего газа (аргон) в вакуумной камере составляло $p = 35 \text{ mPa}$. Генерация ЭП осуществлялась в режиме дугового разряда при амплитуде импульса тока $I_d = 140 \text{ A}$ длительностью $t = 150 \mu\text{s}$ и начальном ускоряющем напряжении $U_0 = 10 \text{ kV}$. В течение импульса генерации дугового разряда происходит рост рабочего давления в вакуумной камере вследствие интенсивного нагрева, плавления и испарения коллектора электронным пучком, что способствует формированию анодной плазмы с повышенной концентрацией, обеспечивающей требуемую проводимость в области дрейфа ЭП.

При отключении источника электропитания дугового разряда ($I_d = 0$) плазменный эмиттер переходит в режим полого катода, а ток плазменного эмиттера начинает замыкаться через диод $D1$. При этом катодное пятно продолжает функционировать на магнелии катода 2, питаясь от высоковольтного источника U_0 . Ионы анодной плазмы, проникая через отверстия эмиссионной сетки 7, инициируют ионно-электронную эмиссию с поверхности дополнительного катодного электрода 3. Возникшие γ -электроны, будучи захваченными в электростатическую ловушку, многократно отражаются от стенок полого катода, способствуя дополнительной ионизации газа. В результате совокупного действия катодного пятна и ионно-электронных процессов поддерживается концентрация катодной и анодной плазмы, достаточная для устойчивого функционирования ВТР с током в сотни

ампер. Генерация ЭП в режиме сильноточного ВТР с током в ускоряющем промежутке $I_0 = 140 \text{ A}$ и начальным ускоряющим напряжением $U_0 \approx 6.5 \text{ kV}$ продолжается на протяжении $550 \mu\text{s}$ до полного разряда высоковольтной конденсаторной батареи емкостью $12 \mu\text{F}$.

С целью экспериментального подтверждения существования катодного пятна в момент отсутствия тока дугового разряда ($I_d = 0$) в полости плазменного эмиттера был установлен дополнительный катодный электрод 3, выполненный из нержавеющей стали. Указанный электрод полностью экранирует поверхность магнелии катода дугового разряда 2 от потока ускоренных ионов и содержит центральное отверстие диаметром 12 mm , обеспечивающее выход электронов из катодного пятна в пространство полого катода. Такая конструкция позволяет реализовать условия, при которых становится возможным разделить токи, обусловленные различными механизмами эмиссии [15]. Ток I_{cs} , связанный с функционированием катодного пятна, протекает через электрод 2, тогда как ток I_{iee} , обусловленный ионно-электронными процессами, инициируемыми воздействием ускоренных ионов, протекает через электрод 3.

На осциллограммах, представленных на рис. 3, видно, что основная доля тока, протекающего в плазменном эмиттере в режиме полого катода, замыкается через электрод 2 и обусловлена функционированием катодного пятна. Штриховой линией на рис. 3 обозначена граница, разделяющая два механизма функционирования разряда. Слева от нее в системе регистрируется ток источника дугового разряда I_d , обеспечивающий функционирование катодного пятна. Справа от штриховой линии $I_d = 0$, функционирование катодного пятна обеспечивается источником напряжения U_0 . Для создания условий, при которых возможно существование ВТР с токами уровня сотен ампер, использовался ЭП с длительностью импульса $150 \mu\text{s}$, извлеченный из плазменного эмиттера с током дугового разряда $I_d = 100 \text{ A}$.

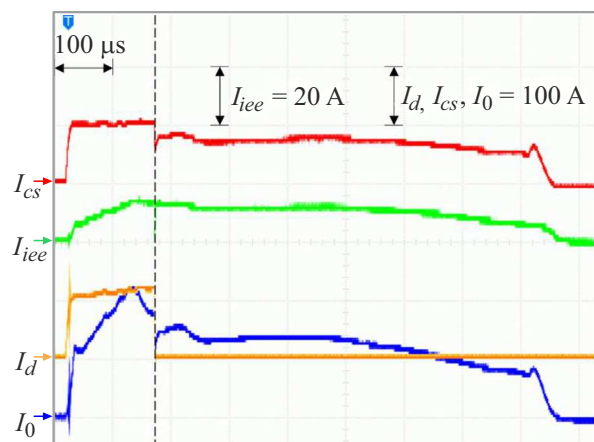


Рис. 3. Типичные осциллограммы, подтверждающие вклад тока катодного пятна в формирование тока плазменного эмиттера в режиме полого катода: $p = 25 \text{ mPa}$, $U_0 = 10 \text{ kV}$, $I_d = 100 \text{ A}$.

В этот период (слева от штриховой линии) ток I_{cs} , связанный с катодным пятном, практически совпадал по величине с I_d , тогда как ток I_{iee} составлял менее 20 А и был обусловлен как бомбардировкой ускоренными ионами и выбитыми ими электронами, так и уходом низкоэнергетических ионов из катодной плазмы. После отключения источника питания дугового разряда и перехода к режиму самоподдерживающегося ВТР ток I_{cs} уменьшился в связи с изменением величины катодного падения потенциала, однако продолжил протекать в квазистационарном режиме с током $I_{cs} \approx 80$ А. Указанный ток сохранялся на протяжении всего импульса генерации ЭП, длительность которого составила почти 700 μ s, вплоть до полного разряда высоковольтной конденсаторной батареи U_0 . Учитывая, что катод дугового разряда 2 экранирован от воздействия ускоренных ионов катодным электродом 3, можно заключить, что наблюдаемая генерация тока I_{cs} может быть обеспечена исключительно за счет устойчивого горения дугового разряда и функционирования катодного пятна.

Таким образом, ток в рассматриваемом самоподдерживающемся ВТР определяется эмиссией электронов из катодного пятна, которое питается от высоковольтного источника. В этом случае реализуется особый режим генерации ЭП, представляющий собой сочетание двух различных механизмов протекания тока: дугового — за счет испарения материала катода катодным пятном в плазменном эмиттере, и тлеющего — за счет испарения материала коллектора, ионизации паров, ускорения ионов и ионно-электронной эмиссии с электродов сеточного плазменного катода. Примечательно, что одновременно существует катодное пятно и ионно-электронная эмиссия, обеспечивающие протекание тока ВТР от одного высоковольтного источника электропитания. Подобная форма разряда, обладающая признаками обоих типов, представляет собой новый, ранее не описанный в научной литературе способ генерации ЭП, который авторы обозначили как „высоковольтный тлеющий разряд с электродуговым сеточным плазменным катодом“. Возможность реализации такого режима протекания тока следует принимать во внимание при реализации технологических процессов с использованием источников электронов с плазменными катодами.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00745 (<https://rscf.ru/project/25-19-00745/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндел, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин, *Плазменные процессы в технологических электронных пушках* (Энергоатомиздат, 1989).
- [2] Н.Н. Коваль, Е.М. Окс, Ю.С. Протасов, Н.Н. Семашко, *Эмиссионная электроника* (МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2009).
- [3] А.А. Новиков, *Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой* (Энергоатомиздат, 1983).
- [4] В.А. Бурдовицин, А.С. Климов, А.В. Медовник, Е.М. Окс, Ю.Г. Юшков, *Форвакуумные плазменные источники электронов* (Изд-во Томск. ун-та, Томск, 2014).
- [5] *Электронно-ионно-плазменная модификация поверхностей цветных металлов и сплавов*, под общ. ред. Н.Н. Ковалья, Ю.Ф. Иванова (Изд-во НТЛ, Томск, 2016).
- [6] V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev, S.V. Kononov, *Fatigue of steels modified by high intensity electron beams* (Cambridge, 2015).
- [7] В.П. Ротштейн, Д.И. Проскуровский, Г.Е. Озур, Ю.Ф. Иванов, *Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками* (Наука, Новосибирск, 2019).
- [8] В.И. Гушенец, Н.Н. Коваль, П.М. Щапин, Письма в ЖТФ, **16** (8), 12 (1990).
- [9] М.С. Воробьев, Н.Н. Коваль, С.А. Сулакшин, ПТЭ, № 5, 112 (2015). [M.S. Vorobyov, N.N. Koval, S.A. Sulakshin, Instrum. Exp. Tech., **58** (5), 687 (2015). DOI: 10.1134/S0020441215040132].
- [10] V.N. Devyatkov, N.N. Koval, P.M. Schanin, V.P. Grigoryev, T.V. Koval, Laser Part. Beams, **21** (2), 243 (2003). DOI: 10.1017/S026303460321212X
- [11] П.В. Москвин, М.С. Воробьев, А.А. Гришков, М.С. Торба, В.И. Шин, Н.Н. Коваль, С.Ю. Дорошкевич, Р.А. Картавцов, Письма в ЖТФ, **49** (11), 43 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.11.55538.19557 [P.V. Moskvina, M.S. Vorobyov, A.A. Grishkov, M.S. Torba, V.I. Shin, N.N. Koval, S.Yu. Doroshkevich, R.A. Kartavtsov, Tech. Phys. Lett., **49** (6), 38 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.06.56376.19557]
- [12] М.С. Воробьев, П.В. Москвин, В.И. Шин, Т.В. Коваль, В.Н. Девятков, Н.Н. Коваль, К.Т. Ашурова, С.Ю. Дорошкевич, М.С. Торба, В.А. Леванисов, ТВТ, **60** (4), 488 (2022), DOI: 10.31857/S0040364422040160 [M.S. Vorobyov, P.V. Moskvina, V.I. Shin, T.V. Koval, V.N. Devyatkov, N.N. Koval, K.T. Ashurova, S.Yu. Doroshkevich, M.S. Torba, V.A. Levanisov, High. Temp., **60** (4), 438 (2022). DOI: 10.1134/S0018151X22040162].
- [13] Р.А. Картавцов, М.А. Мокеев, М.С. Воробьев, П.В. Москвин, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль, А.А. Гришков, В.Н. Девятков, М.С. Торба, Письма в ЖТФ, **51** (4), 15 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.04.59836.20104 [R.A. Kartavtsov, M.A. Mokeev, M.S. Vorobyov, P.V. Moskvina, S.Yu. Doroshkevich, N.N. Koval, A.A. Grishkov, V.N. Devyatkov, M.S. Torba, Tech. Phys. Lett., **51** (2), 70 (2025). DOI: 10.61011/TPL.2025.02.60636.20104].

- [14] В.И. Шин, П.В. Москвин, М.С. Воробьев, В.Н. Девятков, С.Ю. Дорошкевич, Н.Н. Коваль, ПТЭ, № 2, 69 (2021). DOI: 10.31857/S0032816221020191 [V.I. Shin, P.V. Moskvina, M.S. Vorobyev, V.N. Devyatkov, S.Yu. Doroshkevich, N.N. Koval', Instrum. Exp. Tech., **64** (2), 234 (2021). DOI: 10.1134/S0020441221020159].
- [15] Р.А. Картавцов, М.А. Мокеев, М.С. Воробьев, А.А. Гришков, Н.Н. Коваль, С.Ю. Дорошкевич, П.В. Москвин, Д.А. Горьковская, Письма в ЖТФ, **51** (20), 41 (2025). DOI: 10.61011/PJTF.2025.20.61401.20415