

Коммутация тока в маломощном разряде с плазменной инжекцией*В. Л. Бычков, К. И. Дешко, В. А. Черников*

Приводятся результаты экспериментального исследования коммутации тока в маломощном разряде с плазменной инжекцией при использовании импульсного плазмотрона в качестве источника плазмы. Показана возможность полностью управляемой коммутации тока ≈ 6 А при коммутируемом напряжении 300 В и падении напряжения на разряде ≈ 10 В. Установлено, что синхронно с заполнением разрядного промежутка плотной плазмой происходит включение тока, а синхронно с освобождением промежутка от плазмы – отключение. Выдвинуто предположение о связи включения и отключения разрядного тока с зажиганием и гашением на катоде катодного пятна.

Ключевые слова: разряд с плазменной инжекцией, коммутация тока, катодное пятно, магнито-плазменный компрессор.

Введение

Разряд с плазменной инжекцией (РПИ) – самостоятельный электродный разряд, в котором плазма создаётся сторонним источником (плазмотроном) и затем инжектируется в разрядный промежуток. В настоящей работе исследовалась возможность применения РПИ для коммутации тока порядка нескольких ампер при напряжениях до сотен вольт. Под коммутацией тока подразумевается его включение и отключение под действием сторонних механизмов.

Интерес к изучению РПИ обусловлен, в первую очередь, возможностями и перспективами их практического применения – в частности, созданием новых типов газоразрядных коммутирующих приборов [1, 2], источников электронных и ионных пучков [3], разработкой новых методов модификации поверхностных свойств материалов [4]. Значительное внимание уделялось разрядам в области больших токов ($1 \dots 10^3$ кА) и напряжений ($10 \dots 10^3$ кВ) – плазмонаполненным диодам [3], плазменным прерывателям тока [1]. В области

средних токов (десятки – сотни ампер) и средних напряжений (сотни – тысячи вольт) был проведён цикл работ, посвящённый перспективной технологической обработки материалов при помощи РПИ [4].

Интерес к РПИ в области малых напряжений ($10 \dots 10^2$ В) и токов ($0.1 \dots 100$ А), т. е. к относительно маломощным, связан в первую очередь с тем, что многие элементарные процессы в разряде имеют именно такой масштаб по напряжению и току. Так, например, типичный потенциал ионизации составляет порядка десятка вольт, работа выхода – несколько электрон-вольт, пороговый ток ячейки катодного пятна [5] – $0,1 \dots 10$ А. Поэтому изучение маломощных РПИ позволяет прояснить физические механизмы, лежащие именно в их основе.

Практически все исследования РПИ в области малой мощности были связаны с униполярными дуговыми разрядами [6]. Униполярные дуги возникают на поверхности проводника, внесённого в достаточно плотную и горячую плазму. Поэтому интерес к разрядам такого рода был, в первую очередь, обусловлен проблемой эрозии первой стенки в установках управляемого термоядерного синтеза [7]. Заметим, что униполярная дуга является вырожденным электродным разрядом, поскольку единственный проводник является одновременно и анодом, и катодом, при этом внешняя цепь отсутствует.

Маломощный РПИ, горящий в промежутке между двумя включёнными во внешнюю цепь электродами, исследовался, в частности, в работах [8–11]. Однако процессы, протекающие в таких разрядах, всё ещё недостаточно изучены, и потому

Бычков Владимир Львович, в.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: bychvl@gmail.com

Дешко Кирилл Игоревич, физик.

E-mail: kir.deshko@gmail.com

Черников Владимир Антонович, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: vachernikov@rambler.ru

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова.

Россия, 119991 ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

Тел. 8(495) 939-38-85.

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2018 г.

© Бычков В. Л., Дешко К. И., Черников В. А., 2018

подобные исследования остаются актуальными. При этом одной из важных задач является переход к маломощным, малогабаритным источникам инжектируемой плазмы, что необходимо и для физических исследований, и для прикладных применений.

В качестве такого инжектора может выступать маломощный магнитоплазменный компрессор (МПК) с низковольтной системой питания [12] – компактный импульсный плазмотрон, создающий в течение ≈ 100 мкс высокоскоростную (≈ 5 км/с) струю плотной плазмы с концентрацией электронов $n_e \approx 10^{13}$ см $^{-3}$. Предварительные эксперименты [13] показали, что при торможении такой струи на полой преграде возникает ударно-сжатый слой плазмы с существенно ($n_e \approx 10^{16}$ см $^{-3}$) повышенной плотностью. При этом время существования ударно-сжатого слоя ограничено. Таким образом, в начале торможения концентрация электронов резко нарастает (10^{12} см $^{-3} \rightarrow 10^{16}$ см $^{-3}$ за ≈ 1 мкс), а затем через ≈ 30 мкс резко падает (10^{16} см $^{-3} \rightarrow 10^{13}$ см $^{-3}$ за ≈ 1 мкс). Это свидетельствует о перспективности использования МПК в качестве инжектора для экспериментальных исследований маломощного РПИ.

Ясно, что параметры инжектируемой плазмы являются определяющими, поэтому в эксперименте необходимо выполнять их диагностику. Температура электронов, как известно [14], в ударно-сжатом слое изменяется незначительно по сравнению с невозмущённой струёй. Поэтому основной

интерес представляет измерение концентрации электронов. При этом используемый метод диагностики должен обладать широким динамическим диапазоном и достаточным временным разрешением (≤ 1 мкс). Такой метод был предложен в работе [13]. Суть его состоит в размещении на пути плазменной струи СВЧ-зонда, который является одновременно и полой преградой, и средством диагностики. Заметим, что предложенная конструкция зонда позволяет использовать его одновременно и в качестве разрядного промежутка. Это даёт возможность при исследовании РПИ синхронно определять концентрацию электронов в объёме разрядного промежутка.

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование процесса коммутации тока в маломощном разряде с плазменной инжекцией при синхронном измерении концентрации электронов.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка состояла из вакуумной камеры, в которой друг напротив друга устанавливались плазмотрон и зонд, служивший одновременно разрядным промежутком. Их конструкция и взаимное расположение представлены на рис. 1. Все эксперименты проводились в атмосфере сухого воздуха при начальном давлении 50 Торр.

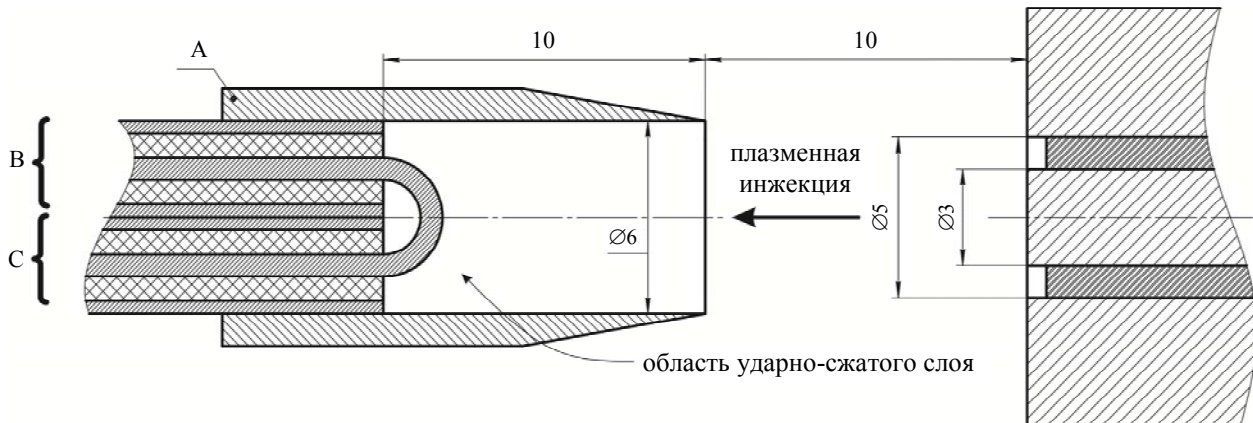


Рис. 1. Конструкция и взаимное расположение зонда (слева) и МПК (справа).

Внутренний электрод ($\varnothing 3$ мм) МПК служил катодом, внешний ($\varnothing 5$ мм) – анодом. В качестве источника питания МПК использовалась накопительная конденсаторная батарея общей ёмкостью ~ 2500 мкФ и рабочим напряжением до 300 В. Инициация разряда осуществлялась системой последовательного высоковольтного поджига. Разряд носил аperiодический характер, а именно, за ≈ 10 мкс ток нарастал до своего максимального

значения 5 кА и затем экспоненциально спадал с постоянной времени ≈ 100 мкс.

Зонд представлял собой небольшую ($\varnothing 6 \times 10$ мм) латунную трубку (поз. А на рис. 1), являющуюся отрезком цилиндрического волновода. В один из концов волновода вводилась коаксиальная линия связи. Линия была выполнена в виде двух сложенных вместе коаксиальных кабелей (поз. В и С на рис. 1) с общим центральным про-

водником. В один из кабелей от генератора подавался зондирующий СВЧ-сигнал (частота 8 ГГц, мощность ≤ 1 мВт) и измерялись мощности прошедшей через коаксиальную линию и отражённой волн. По измеренным мощностям рассчитывались значения концентрации электронов и частоты их соударений с нейтральными атомами. Градуировочная характеристика такого зонда, т. е. связь между параметрами плазмы и величинами мощности, предварительно определялась при помощи численного моделирования. Плазма при этом рассматривалась как однородная среда с диэлектрическими проницаемостями, описываемыми моделью Друде [13].

Предложенная конструкция зонда позволяла использовать его одновременно и как разрядный промежуток для коммутации тока. Для этого между волноводом и петлёй связи прикладывалось напряжения от внешней цепи, как это показано на рис. 2. При этом волновод служил анодом, а петля – катодом по отношению к разряду. Внешняя цепь состояла из сопротивления нагрузки $R = 50$ Ом, ограничивающего максимальный ток, и конденсатора $C = 10$ мкФ, предварительно заряжаемого до напряжения $U_0 = (1 \dots 300)$ В от внешнего источника. Для исключения взаимного влияния цепь питания разряда и цепь СВЧ-диагностики разделялись по частоте при помощи фильтров F3 с полосой пропускания $(0 \dots 0.5)$ ГГц и F1, F2 с полосой $(8 \pm 0,03)$ ГГц соответственно.

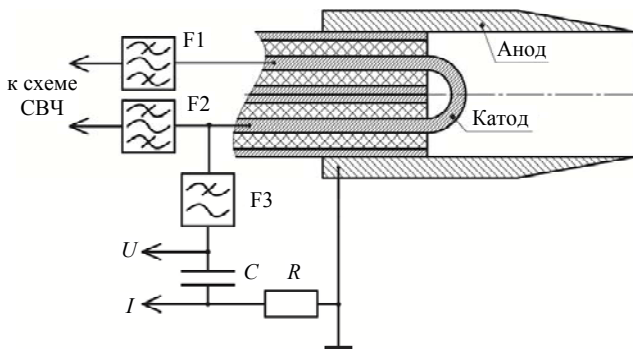


Рис. 2. Система питания разряда. U – выход падения напряжения на разряде, I – выход сигнала, пропорционального разрядному току.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3. представлен временной профиль концентрации электронов в объёме разрядного промежутка, а также полученные синхронно с ним осциллограммы тока и падения напряжения на разряде. Качественно динамика изменения концентрации электронов характерна для случая торможения плазменной струи на полой преграде и согласуется с результатами других авторов [14–16].

Через некоторое время после начала разряда МПК происходит резкое нарастание концентрации электронов, связанное с полным торможением струи. В это время плазма существенно неоднородна, и использованный метод диагностики приводит к значительным погрешностям (\pm порядок), не позволяющим получить точные значения плотности электронов. Про величину электронной концентрации можно лишь сказать, что она превышает 10^{15} см $^{-3}$. Вместе с тем, момент резкого нарастания концентрации может быть определён с точностью до 1 мкс.

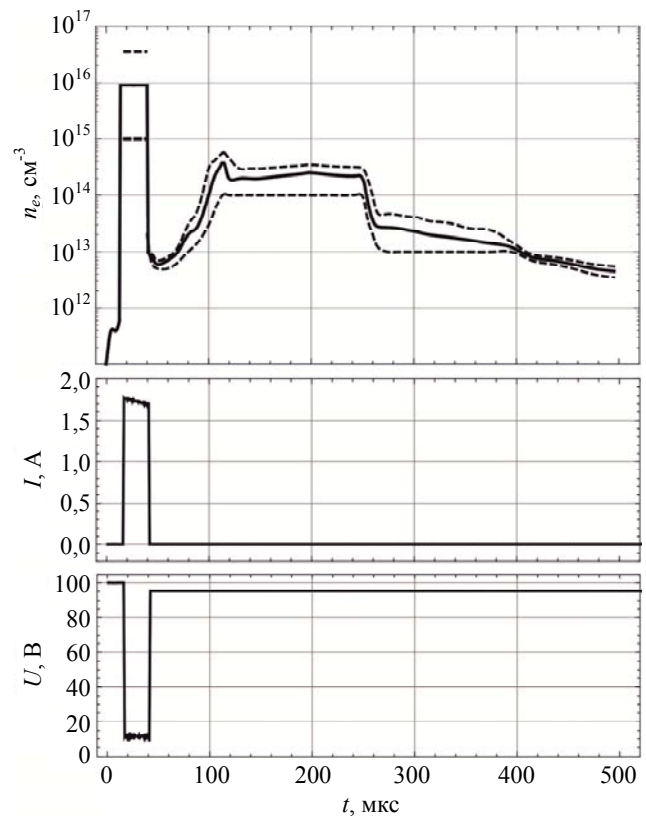


Рис. 3. Характерная динамика изменения концентрации электронов n_e в объёме электродной системы (пунктиром отмечен доверительный интервал) и осциллограммы тока I и падения напряжения U на разряде при $U_0 = 100$ В. Отсчёт времени начинается с момента срабатывания МПК.

Существенное возрастание давления и плотности газа в ударно-сжатом слое приводит к отражению плазмы с возникновением обратной плазменной волны, распространяющейся навстречу первоначальному потоку. В результате через некоторое время (≈ 30 мкс) происходит резкий «вынос» плазмы из объёма разрядного промежутка, приводящий к падению плотности электронов. Затем наблюдается ещё одно, вторичное, нарастание концентрации, связанное с тем, что первоначальная струя ещё существует. Однако при этом концентрация электронов нарастает существенно медленнее и до меньших (на один-два порядка) значений.

Как следует из осциллограмм, представленных на рис. 3, при начальном напряжении $U_0 = 100$ В заполнение разрядного промежутка плотной плазмой одновременно приводит к резкому возрастанию тока; при этом падение напряжения на промежутке снижается до величины ≈ 10 В. В течение следующих 30 мкс, т. е. вплоть до резкого снижения концентрации электронов, падение напряжения остаётся практически постоянным; уменьшение же разрядного тока вызвано уменьшением напряжения на питающем конденсаторе С вследствие его разряда.

Резкое снижение концентрации электронов приводит к синхронному обрыву коммутируемого тока. При последующем нарастании концентрации электронов разрядный ток уже существенно меньше и потому на осциллограмме не фиксируется.

Было установлено, что протекание коммутируемого тока не приводит (в пределах погрешности метода диагностики) к изменению средней по объёму зонда концентрации электронов. При изменении начального напряжения U_0 изменяется только амплитуда разрядного тока; форма же его качественных изменений не претерпевает. На зависимости амплитуды тока от начального напряжения (рис. 4) наблюдается качественное изменение в виде скачка тока и, соответственно, уменьшения напряжения на разряде с ≈ 70 В до ≈ 10 В. Это качественное изменение было проинтерпретировано как зажигание на катоде катодного пятна.

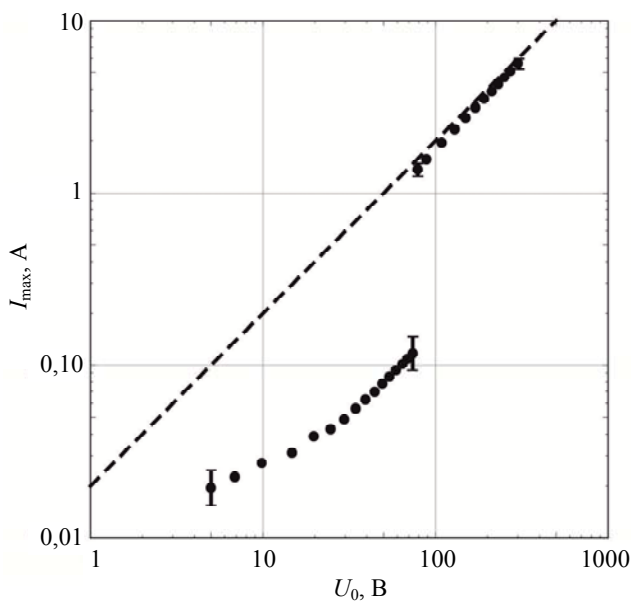


Рис. 4. Зависимость амплитуды I_{\max} тока разряда от начального напряжения U_0 . Пунктиром отмечен максимально возможный ток (ограничен сопротивлением нагрузки).

Действительно, известно [5, 17], что катодное пятно может существовать, начиная с некоторого порогового тока, определяемого материалом катода. Пороговый ток лежит в диапазоне $0.1 \dots 10$ А и зависит, в первую очередь, от теплопроводности и температуры кипения материала катода. В настоящей работе катод был изготовлен из меди, и полученное значение порогового тока 1,4 А практически совпадает с известным [5] значением для меди (1,6 А).

Возможны два механизма, способных привести к зажиганию пятна: локальный взрывной разогрев катода током автоэлектронной эмиссии или контракция тлеющего разряда. Последняя может происходить в результате развития ионизационно-перегревной неустойчивости. Локальный взрывной разогрев является более вероятным механизмом. Действительно, зажигание пятна происходит при довольно малом для тлеющего разряда напряжении $R \times I_c \approx 70$ В. Уменьшение сопротивления нагрузки R или использование катодов из металлов с меньшим пороговым током пятна I_c позволит ещё снизить это напряжение до величин, при которых тлеющий разряд развиваться гарантированно не может.

Принципиальным условием для развития взрывного разогрева является достаточно сильное электрическое поле вблизи поверхности катода $E_c \gtrsim 5 \times 10^8$ В/м [18]. Оценим напряжённость поля в прикатодном слое, достигаемую в настоящей работе, без учёта приложенного к промежутку напряжения. В этом случае катод [6] находится под плавающим потенциалом $\varphi_{pl} = -\frac{T_e}{2} \ln\left(\frac{M}{2\pi m}\right)$ относительно потенциала плазмы $\varphi_{pl} \equiv 0$, где m и T_e – масса и температура электронов, M – масса иона. При этом характерная толщина прикатодного слоя имеет размер порядка радиуса Дебая. В результате при $T_e \approx 5$ эВ и $n_e \approx 10^{16}$ см⁻³ напряжённость составляет $E \approx 10^8$ В/м, т. е. соответствует по порядку величины значению E_c .

Приведённая оценка справедлива для среднего значения напряжённости. Вместе с тем, ясно, что поверхность катода всегда неоднородна и на ней присутствуют т. н. концентраторы напряжённости, существенно усиливающие локальное поле. К ним следует в первую очередь отнести шероховатость поверхности (микровыступы, трещины, следы эрозии от предыдущих разрядов, границы зёрен и т. п.) и её загрязнения (диэлектрические плёнки, адсорбированные пары). Даже для специально подготовленных (полированных и очищенных) катодов коэффициент локального усиления поля оказывается порядка 10 [1, 19].

Таким образом, с учётом локального усиления достигаемой в настоящих экспериментах напряжённости поля у поверхности катода оказывается достаточно для взрывного зажигания катодного пятна. Существование пороговой напряжённости позволяет также объяснить, почему пятно не зажигалось при вторичном нарастании концентрации электронов (начиная с ≈ 80 -й микросекунды).

Заключение

В работе впервые показана возможность полностью управляемой коммутации тока ≈ 6 А в маломощном разряде с плазменной инъекцией при использовании в качестве источника плазмы маломощного магнитоплазменного компрессора.

Использование СВЧ-зонда одновременно и для диагностики плазмы, и в качестве разрядного промежутка позволило установить, что включение и отключение тока происходит одновременно (с точностью 1 мкс) с резким возрастанием и спадом плотности электронов. Коммутация тока происходит при заполнении разрядного промежутка плазмой с концентрацией электронов $\approx 10^{16}$ см⁻³ (доверительный интервал $10^{15} \dots 10^{17}$ см⁻³). При этом протекание коммутируемого тока не приводит к заметному увеличению концентрации электронов.

Относительно высокий разрядный ток при малом падении напряжения на разряде 10 В (порядка типичного катодного падения в дуговом разряде) позволили предположить, что коммутация тока связана с зажиганием на катоде катодного пятна. В качестве возможного механизма, приводящего к зажиганию пятна, может выступать локальный взрывной разогрев катода током автоэлектронной эмиссии. Выполненные оценки показывают, что напряжённости электрического поля в

прикатодном слое оказывается достаточно для взрывного разогрева и зажигания пятна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004.
2. Асюнин В. И., Давыдов С. Г., Долгов А. Н., Козловская Т. И., Ревазов В. О., Селезнёв В. П., Якубов Р. Х. // ТВТ. 2017. № 2. С. 191.
3. Мхеидзе Г. П., Савин А. А. // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 63.
4. Иванов В. А., Сахаров А. С., Коньжеев М. Е. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 697.
5. Кесаев И. Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968.
6. Зыкова Н. М., Недоспасов А. В., Петров В. Г. // ТВТ. 1983. Т. 21. № 4. С. 778.
7. Barendolts S. A., Mesyats G. A., Tsventoukh M. M. // Nuclear Fusion. 2010. Vol. 50. No. 12. P. 125004. (DOI: 10.1088/0029-5515/50/12/125004)
8. Robson A. E., Thonemann P. C. // Proceedings of the Physical Society. 1959. Vol. 73. P. 508.
9. Maeno M., Ohtsuka H., Yamamoto S., Yamamoto T., Suzuki N., Fujisawa N., Ogiwara N. // Nuclear Fusion. 1980. Vol. 20. No. 11. P. 1415.
10. Stampa A., Kruger H. // Journal of Physics D: Applied Physics. 1983. Vol. 16. No. 11. P. 2135.
11. Wang S. G., Brown I. G. // Review of Scientific Instruments. 1999. Vol. 70. No. 9. P. 3583.
12. Дешко К. И., Черников В. А. // Прикладная физика. 2018. № 1. С. 15.
13. Дешко К. И. / Сборник тезисов научной конференции «Ломоносовские чтения». Секция физики. – М.: МГУ им. М. В. Ломоносова. 2017. С. 26.
14. Асташинский В. М., Кузьмицкий А. М., Мишук А. А. // Журнал прикладной спектроскопии. 2011. Т. 78. № 3. С. 404.
15. Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С. // ТВТ. 1978. № 6. С. 1235.
16. Асташинский В. М., Баканович Г. И., Минько Л. Я. // Физика плазмы. 1984. № 10. С. 1058.
17. Anders A. Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation. – N.Y.: Springer, 2008.
18. Alpert D., Lee D. A., Lyman E. M., Tomaschke H. E. // Journal of Vacuum Science and Technology. 1964. Vol. 1. No. 2. P. 35.
19. Месяц Г. А. Взрывная электронная эмиссия. – М.: Физматлит, 2011.

PACS: 52.75.Kq, 52.80.-s, 52.59.Dk

Current switching in a low-power discharge with plasma injection

V. L. Bychkov, K. I. Deshko, and V. A. Chernikov

Lomonosov Moscow State University
Bld. 2, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: kir.deshko@gmail.com

Received April 2, 2018

Experimental results are presented on current commutation in a low-power gas discharge with external plasma injection using pulsed plasma source (plasma gun) as an injector. Feasibility of ≈ 6 A

fully controlled current switching from 300 Volts is shown with a discharge voltage drop ≈ 10 V. It is established that the current on-switching is synchronous with discharge gap filling with dense plasma, and off-switching is synchronous with plasma ejecting from the gap. A hypothesis on connection between current switching and cathode spot ignition has been put forward.

Keywords: discharge with plasma injection, current switching, cathode spot, magnetized plasma compressor, plasma gun.

REFERENCES

1. G. A. Mesyats, *Pulsed Power and Electronics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
2. V. I. Asyunin, S. G. Davydov, A. N. Dolgov, T. I. Kozlovskaya, V. O. Revazov, V. P. Seleznev, and R. H. Yakubov, *High Temperature* **55** (2), 191 (2017).
3. G. P. Mkheidze and A. A. Savin, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 63 (2008).
4. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (6), 697 (2013).
5. I. G. Kesaev, *Cathode Processes of an Electric Arc* (Nauka, Moscow, 1968) [in Russian].
6. N. M. Zyкова, A. V. Nedospasov, and V. G. Petrov, *High Temperature* **21** (4), 778 (1983).
7. S. A. Barengolts, G. A. Mesyats, and M. M. Tsventoukh, *Nuclear Fusion*. **50** (12), 125004 (2010) (DOI: 10.1088/0029-5515/50/12/125004).
8. A. E. Robson and P. C. Thonemann, *Proc. of the Physical Society* **73**, 508 (1959).
9. M. Maeno, H. Ohtsuka, S. Yamamoto, T. Yamamoto, N. Suzuki, N. Fujisawa, and N. Ogiwara, *Nuclear Fusion* **20** (11), 1415 (1980).
10. A. Stampa and H. Kruger, *Journal of Physics D: Applied Physics* **16** (11), 2135 (1983).
11. S. G. Wang and I. G. Brown. *Review of Scientific Instruments* **70** (9), 3583 (1999).
12. K. I. Dешко and V. A. Chernikov, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 15 (2018).
13. K. Dешко, in *Proc. Sci. Conf. "Lomonosov Readings: Phys."* (Lomonosov MSU, Moscow, 2017) P. 26.
14. V. M. Astashinsky, A. M. Kuzmitsky, and A. A. Mishchuk, *Zhurn. Prikl. Spektroskop.* **78** (3), 404 (2011).
15. A. S. Kamrukov, N. P. Kozlov, and U. S. Protasov, *High Temperature* **6** 1235 (1978).
16. V. M. Astashinsky, G. I. Bakanovich, and L. Ya. Miniko, *Plasma Phys. Rep.* **10**, 1058 (1984).
17. A. Anders, *Cathodic arcs: from fractal spots to energetic condensation*. (Springer, N.Y., 2008).
18. D. Alpert, D. A. Lee, E. M. Lyman, and H. E. Tomaschke, *Journal of Vacuum Science and Technology* **1** (2), 35 (1964).
19. G. A. Mesyats, *Explosive Electron Emission*. (Fizmatlit, Moscow, 2011) [in Russian].